



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Т. 31, № 2

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Том 31. № 2

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

B. Nacke (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2023. Том 31. № 2)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи информационных
технологий и массовых
коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 27.07.23
Выход в свет 04.08.23

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 25,87 п.л.
Уч.-изд. л. 25,27 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 135/23
Заказ № 321

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2023
© Самарский государственный
технический университет, 2023

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2023. Vol. 31. Issue 2

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Executive Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V . Z a g r e b i n a
Compiled and typeset by O . S . A f a n a s e v a

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU
and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>)
and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Боряев Р.О., Чуваков А.В.</i> Квантовые вычисления в автоматизированных системах управления факторинговыми операциями	6
<i>Волхонская Е.Е.</i> Задача оптимального назначения автономных транспортных средств в производственно-логистической системе	20
<i>Данилушкин И.А., Колпацников С.А., Лысенко Д.С.</i> Динамическая модель водогрейного котла-утилизатора	31
<i>Дыда А.А., Пушкарёв И.И., Красавина А.Ф.</i> Разработка программного симулятора движения и расхождения безэкипажного судна	43
<i>Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю.</i> Интервальный анализ трафика многоканальных систем массового обслуживания.....	56
<i>Мионов Е.А.</i> Моделирование и управление процессами производства водорода на основе электролиза	70
<i>Семенова В.А., Смирнов С.В.</i> Функциональное наполнение и архитектура программной лаборатории для онтологического анализа данных...	85

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Белослудцев В.А., Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н.</i> Влияние температуры внешней среды на параметры электрической цепи чувствительного элемента кластерного вихретокового датчика металлической стружки в системах смазки газотурбинных двигателей.	101
<i>Гаспаров Э.С., Маркосян Г.А., Казакова О.Ю.</i> Исследование зависимости собственных частот роторной системы с вертикально расположенным ротором от предварительного натяга	118

Энергетика и электротехника

<i>Ведерников А.С., Шипилов А.С., Ярыгина Е.А.</i> Факторы, влияющие на прогнозирование электропотребления системы собственных нужд АЭС	129
---	-----

Информационные технологии и коммуникации

УДК 530.145.82:658.3:621.391.24

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРИНГОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ

Р.О. Боряев, А.В. Чуваков*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: r.boryaev@gmail.com, avch2105@gmail.com

Аннотация. Описываются существующие подходы по автоматизации в системах управления факторинговыми операциями. Анализируется актуальность данной проблемы через оценку объема и динамики роста рынка факторинговых операций в РФ. Рассматриваются имеющиеся проблемы с производительностью, которые присущи программным комплексам, построенным на основе классических алгоритмов, а также предлагается их оптимизация путем использования алгоритмов на основе квантовых вычислений. Акцентируется внимание на проблеме параллельных вычислений как основного свойства, позволяющего добиться существенного увеличения вычислительной способности. Приводится возможный путь решения на основе совместного использования квантового и классического подходов в рамках одного программного комплекса. Описывается применение квантового метода Монте-Карло в целях улучшения автоматизированной информационной системы предприятия. Полученный результат позволяет сделать вывод о перспективности использования данной методики для построения комбинированных квантовых и классических алгоритмов в системах управления факторинговыми операциями.

Ключевые слова: автоматизированные информационные системы, факторинг, квантовые вычисления, параллельные вычисления, кубит, суперпозиция, квантовый метод Монте-Карло.

Введение

Особыми видами специализированной управленческой деятельности, выделившимися в процессе разделения управленческого труда, являются функции управления [1]. Наиболее простым и доступным для понимания является деление функций управления на две группы: общие и специальные, т. е. функции по управлению теми или иными объектами организации, в том числе финансами. Важную роль в функции по управлению объектом «финансы» играют современные инструменты по управлению дебиторской задолженностью, в первую очередь факторинг. В наиболее простом понимании факторинг – это



© Автор(ы), 2023

* Родион Олегович Боряев, аспирант кафедры «Вычислительная техника».

Александр Владимирович Чуваков, кандидат химических наук, заведующий кафедрой «Вычислительная техника».

продажа дебиторской задолженности, а точнее передача агентских функций по ее управлению третьей стороне.

В данной статье ставится задача по определению значимости факторинга в автоматизированной информационной системе (АИС) управления предприятием и возможных путей по повышению эффективности использования данного процесса с помощью применения современных методов оптимизации алгоритмов с использованием квантовых вычислений.

Значимость факторинга в АИС управления предприятием

Факторинг с позиции клиента освобождает предприятия от исполнения функции по управлению портфелем товарных кредитов. Для определения значимости факторинговой деятельности предлагается оценить объемы и динамику факторингового рынка за последние три года для того, чтобы понять, насколько актуален данный вид финансовой деятельности в текущих реалиях российской экономики [2–4].

Для проведения оценки объемов указанного рынка услуг воспользуемся данными, предоставляемыми Ассоциацией факторинговых услуг – негосударственной некоммерческой организацией, объединяющей юридических лиц, осуществляющих факторинговые операции в России, а также организации, деятельность которых связана с предоставлением факторинговых услуг. Членами данной организации являются крупнейшие представители рынка кредитования России, такие как ООО «СберФакторинг», ООО «ВТБ факторинг», АО «Альфа-Банк», ПАО «Банк "ФК Открытие"», ООО «РСХБ факторинг».

Совокупный портфель российского рынка факторинга вырос за этот период с 0,8 до 1,5 трлн руб., а объем выплаченного финансирования – с 3,1 до 5,8 трлн руб. (рис. 1).

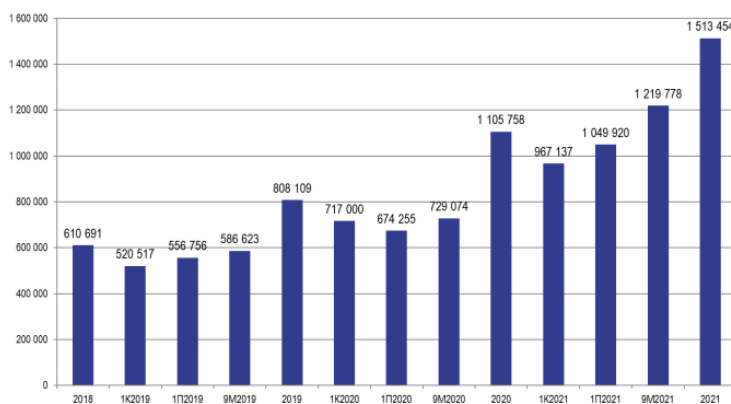


Рис. 1. Поквартальная динамика портфеля, млн рублей

Можно сделать вывод о положительной динамике роста спроса на факторинговые услуги в российской экономике.

АИС управления факторинговыми операциями

С учетом объема рынка факторинговых операций невозможно представить себе использование данного финансового продукта без частичной или полной

автоматизации операций, необходимых для его применения. При этом различными программными комплексами может быть реализована как автоматизация по части учета данных, так и автоматизация алгоритмов принятия факторинговых решений. Рассмотрим программные комплексы, применяемые на данный момент для решения указанных задач.

«Контур. Факторинг»

Программный продукт «Контур. Факторинг» предназначена для обмена электронными документами в рамках факторинговых операций. Пользователь выполняет все действия на сервере оператора программы, ему не требуется самому отслеживать и устанавливать какие-либо обновления программы на свой ПК. Все изменения выполняются автоматически на сервере. Данный программный продукт решает только задачи по учету данных, без возможности автоматизации принятия факторинговых решений.

«БАНК 21 ВЕК»

Данный программный комплекс состоит из двух модулей. Подсистема «Факторинг» предназначена для организации учета факторинговых операций и позволяет осуществить комплексную автоматизацию факторинговой деятельности в банке или факторинговой компании. Подсистема «Факторинг – клиентский офис» предназначена для клиентов факторинговой компании и позволяет поставщикам в режиме онлайн получать оперативную информацию по своим договорам факторингового обслуживания. Возможности автоматизации принятия факторинговых решений частично реализованы.

«САМ»

Программный комплекс «САМ» от компании Professor Schumann GmbH включает в свой состав модуль для проведения факторинговых операций. Предоставляет широкие возможности по подключению внешних поставщиков информации, необходимой для принятия управленческих решений. Данный продукт позволяет как вести учет всех необходимых данных для проведения факторинговых операций в отношении продавцов и покупателей, так и гибко формировать алгоритмы принятия решения в отношении лимитов, выдаваемых клиентам факторинговых компаний. Алгоритмы могут формироваться самим предприятием путем написания новых либо модификации существующих bpmn процессов.

Edisoft Factoring

Факторинговая площадка Edisoft Factoring соединяет дебитора, кредитора и факторинговую компанию, позволяя проводить сделки по уступке дебиторской задолженности в электронном виде. Edisoft Factoring берет на себя операции по формированию заявок и автоматической проверке данных, позволяя быстро проводить сделки и получать деньги. Возможности автоматизации принятия факторинговых решений частично реализованы.

РaaS системы

Многие крупные компании, предоставляющие факторинговые услуги, такие как «СберФакторинг», имеют системы учета данных и принятия факторинговых решений собственной разработки, не предоставляемые как отдельно продаваемый продукт. Данные программные комплексы используются для предоставле-

ния услуг в виде Product as a Service (продукт как сервис) и решают задачи как учета данных, так автоматизации принятия факторинговых решений, так как факторинговой компанией является сам держатель данного продукта.

Рассмотренные системы обеспечивают разную степень автоматизации управления процессом факторинга и принятия факторинговых решений. В то же время все указанные системы предназначены для учета и обработки больших объемов данных, необходимых для обеспечения поддержки принятия факторинговых решений с использованием алгоритмов на основе классических вычислений.

Проблемы при оценке рисков и принятии автоматизированных решений в факторинговых операциях

Возрастающий объем рынка факторинга требует принятия все более сложных управленческих решений. А высокая степень автоматизации принятия решений в сфере факторинговых операций освобождает предприятия от исполнения функции по контролю за портфелем товарных кредитов. В то же время из-за увеличения объемов рынка и привлекательности факторинга как финансового инструмента, эффективно решающего указанные нами выше задачи предприятия, нагрузка на факторинговые программные продукты неуклонно возрастает.

Для принятия эффективного решения в отношении изменения или подтверждения кредитных лимитов контрагентов автоматизированной информационной системе необходимо получение входной информации от рейтинговых агентств, обладающих сведениями о текущем состоянии компаний и физических лиц, участвующих в проведении сделок с применением факторинговых финансовых инструментов. С учетом высокой автоматизации при наличии хотя бы 100 сделок в день на 15000 тысяч контрагентов с проверкой от 20 до 40 входящих параметров от рейтинговых агентств на каждую сделку у нас отсутствует возможность построения для каждой факторинговой операции эффективной вероятностной модели указанных входных параметров с использованием классических алгоритмов. А значит, в существующих системах автоматизации факторинговых операций при любом отклонении входных параметров от средних значений необходимо ручное вмешательство кредитных специалистов.

В последние годы очень интенсивно развиваются квантовые вычисления – это подход, использующий понятия квантовой физики [5]. Рассмотрим возможность использования квантовых вычислений в управляющих алгоритмах с целью восполнения указанного пробела в существующих АИС по управлению факторинговыми операциями.

Квантовые вычисления

Основные операции для преобразования и обработки информации, которые используются в классических алгоритмах, – это однобитное преобразование НЕ (NOT) и двухбитные преобразования И (AND) и ИЛИ (OR). Данные операции описываются при помощи таблиц истинности, т. е. приводится соответствие выходных значений входным. Готовый алгоритм, основанный на классических вычислениях, – это набор последовательных битовых операций. В квантовых вычислениях, как и в классических, используются логические преобразования – вентили.

Наиболее важными квантовыми вентилями с одним кубитом являются операторы Паули X , Y , Z , ворота Адамара H , ворота фазового сдвига (иногда обозна-

чаемые P). Операторы Паули могут быть представлены в форме матрицы в следующем виде:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Ворота Адамара – это операция с одним кубитом, преобразующая базисное состояние $|0\rangle$ в $\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$ и $|1\rangle$ в $\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Также нам необходим двухкубитный гейт CNOT – управляемый вентиль НЕ (6). Действие вентиль CNOT может быть представлено в следующем виде:

$$|c, t\rangle \rightarrow |c, t \oplus c\rangle. \quad (6)$$

Следовательно, если контрольный кубит установлен в единицу, то целевой кубит меняется на ноль. Матричное представление вентиль CNOT выглядит так:

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В дополнение к обычному управляемому вентилю НЕ можно построить вентиль НЕ, управляемый функцией, который принимает на вход произвольное число $n+1$ кубитов, где $n+1$ больше или равно 2 (квантовый регистр). Этот вентиль переворачивает последний кубит регистра тогда и только тогда, когда встроенная функция с первыми n кубитами в качестве входных данных возвращает 1.

Используя указанные гейты, мы можем сформировать блоки квантовых схем подобно тому, как делаем это с системами классических гейтов И, ИЛИ и НЕ [6].

Измерения показывают, что выполнение одного квантового гейта занимает около 1 наносекунды, что больше, чем для классического гейта [7]. Так что алгоритмы для квантового вычислителя должны не копировать классические, а по максимуму использовать уникальные свойства квантовой механики, такие как квантовый параллелизм.

Квантовый параллелизм

Фундаментальным свойством квантовых вычислений является квантовый параллелизм, который позволяет получить значения функции $f(x)$ для всех возможных x одновременно [8].

Квантовое вычисление C , реализованное на квантовом регистре, преобразует входную строку $i_1 \dots i_N$ в выходную строку $O_1(i), \dots, O_N(i)$:

$$\begin{pmatrix} O_1(i) \\ \vdots \\ O_N(i) \end{pmatrix} = U(C) \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_N \end{pmatrix}; (i)_{10} = (i_1 \dots i_N)_2. \quad (8)$$

Состояния базиса вычислений (CB) обозначаются как

$$|i_1 \dots i_N\rangle = |i_1\rangle \otimes \dots \otimes |i_N\rangle; i_1, \dots, i_N \in \{0, 1\}. \quad (9)$$

Линейная суперпозиция позволяет нам сформировать следующее $2N$ -кубитное состояние:

$$|\psi_{in}\rangle = \left[\frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_i |i_1 \dots i_N\rangle \right] \otimes |0 \dots 0\rangle. \quad (10)$$

После применения квантовой операции $U(C)$ выход можно представить в виде

$$|\psi_{out}\rangle = U(C)|\psi_{in}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_i |i_1 \dots i_N\rangle \otimes |O_1(i) \dots O_N(i)\rangle. \quad (11)$$

Квантовый компьютер смог закодировать все входные строки, сгенерированные C , в $|\psi_{out}\rangle$; другими словами, он одновременно прошел $2N$ классических путей. Эта способность квантового компьютера кодировать множество результатов вычислений в квантовое состояние за один квантовый вычислительный шаг известна как квантовый параллелизм.

Квантовая схема для одновременной оценки $f(0)$ и $f(1)$ функции $f(x)$: $\{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$ показана на рис. 2. Ее выходное состояние содержит информацию как о $f(0)$, так и о $f(1)$.

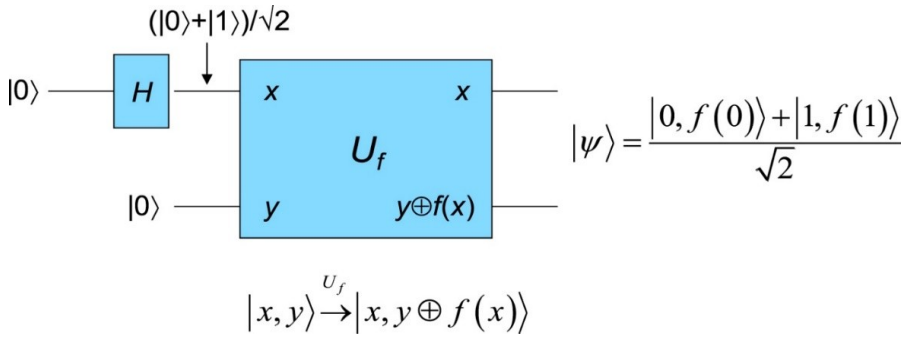


Рис. 2. Квантовая схема для одновременного вычисления $f(0)$ и $f(1)$

Выход схемы, показанной на рис. 1, теперь может быть получен как

$$|\psi\rangle = U_f |H0 \otimes 0\rangle = U_f \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0, f(0)\rangle + |1, f(1)\rangle), \quad (12)$$

что доказывает, что схема с рис. 1 действительно может одновременно вычислять $f(0)$ и $f(1)$.

Теперь мы хотели бы обобщить вычисление $f(x)$ на $n + m$ кубитах, как показано на рис. 3.

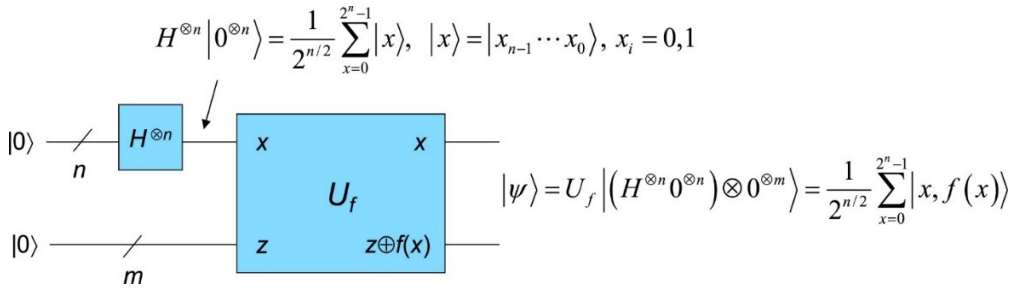


Рис. 3. Квантовая схема для оценки $f(x)$ на $n + m$ кубитах

Хотя в

$$|\psi\rangle = (|0, f(0)\rangle + |1, f(1)\rangle) / \sqrt{2} \quad (13)$$

содержится информация как о $f(0)$, так и о $f(1)$, квантовые вычисления не имеют никаких преимуществ перед классическими, если требуется вычисление всех значений функции $f(x)$. Это означает, что отсутствует возможность напрямую использовать квантовые аналоги классических алгоритмов, применяя при этом квантовый параллелизм как преимущество. С другой стороны, квантовые вычисления позволяют нам оценить некоторое глобальное свойство, скажем,

$f(0) \oplus f(1)$, выполнив только одну оценку $f(x)$ [9]. Этот пример позволит нам описать концепцию применения квантовых вычислений и показать перспективу их применения для оптимизации алгоритмов автоматизированных информационных систем управлением факторинговыми операциями. Квантовая схема, реализующая алгоритм Дойча, показана на рис. 4.

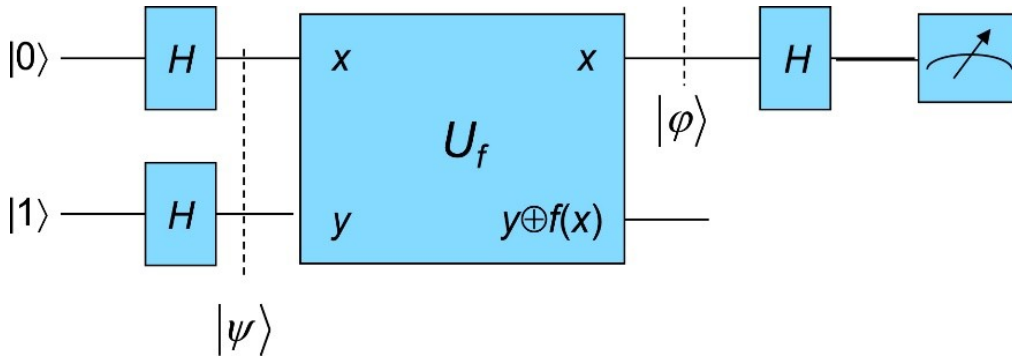


Рис. 4. Квантовая схема, реализующая алгоритм Дойча

Состояние $|\psi\rangle$ после стадии адамаровых ворот задается следующим образом:

$$|\psi\rangle = H|0\rangle \otimes H|1\rangle = \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle - |1\rangle) = \frac{1}{2} \left(\sum_{x=0}^1 |x\rangle \right) (|0\rangle - |1\rangle). \quad (14)$$

Применение оператора U_f к $|\psi\rangle$ выполняет следующее отображение:

$$\text{при } f(x) = 0 \Rightarrow (|0\rangle - |1\rangle) \rightarrow (|0\rangle - |1\rangle),$$

$$\text{при } f(x) = 1 \Rightarrow (|0\rangle - |1\rangle) \rightarrow (|1\rangle - |0\rangle) = -(|0\rangle - |1\rangle).$$

Комбинируя эти два варианта, то же самое отображение можно представить в виде

$$(|0\rangle - |1\rangle) \rightarrow (-1)^{f(x)} (|0\rangle - |1\rangle). \quad (15)$$

Так что действие U_f на $|\psi\rangle$ будет выглядеть следующим образом:

$$U_f |\psi\rangle = U_f H|0\rangle \otimes H|1\rangle = \frac{1}{2} \left(\sum_{x=0}^1 (-1)^{f(x)} |x\rangle \right) (|0\rangle - |1\rangle). \quad (16)$$

Оператор, выполняющий отображение

$$|x\rangle \xrightarrow{U_f} (-1)^{f(x)} |x\rangle, \quad (17)$$

известен как оператор оракула. Верхний и нижний регистры в правой части схемы, показанной на рис. 3, распутываются после выполнения оператора оракула. Выходное состояние в верхней ветви (см. рис. 3) задано:

$$|\Phi\rangle = \left[(-1)^{f(0)} |0\rangle + (-1)^{f(1)} |1\rangle \right] / \sqrt{2}; \quad (18)$$

и, применяя ворота Адамара, мы получаем:

$$H|\Phi\rangle = \frac{1}{2} \left[(-1)^{f(0)} + (-1)^{f(1)} \right] |0\rangle + \frac{1}{2} \left[(-1)^{f(0)} - (-1)^{f(1)} \right] |1\rangle. \quad (19)$$

Выполнив измерение, можем получить два возможных состояния:

– вариант 1: кубит $|0\rangle$ является конечным состоянием после измерения, что означает, что $f(0) = f(1)$; другими словами, функция $f(x)$ постоянна;

– вариант 2: получен кубит $|1\rangle$, что означает, что $f(0) \neq f(1)$, то есть функция $f(x)$ сбалансирована (выходы противоположны для половины входов).

Таким образом, в данном примере мы использовали концепцию квантового параллелизма, чтобы обойти явное вычисление $f(x)$ [10], при этом был проведен лишь один шаг вычисления, в отличие от минимум двух вычислений при использовании классического решения рассмотренной задачи.

Алгоритм Монте-Карло

Теперь применим данный принцип к подходящему элементу расчета в автоматизированной системе факторинговых операций. Важным элементом поддержки принятия факторинговых решений является управление кредитными рисками, основанное на применении инструментов анализа данных. Для решения данной задачи с учетом высокой информационной закрытости финансовых компаний, что является особенностью не только российского, но и зарубежного рынка, применяется имитационное моделирование по методу Монте-Карло [14].

Метод Монте-Карло используется для моделирования вероятности различных результатов в процессе, который трудно предсказать из-за вмешательства случайных величин. Это метод, используемый для понимания влияния риска и неопределенности. При возникновении значительной неопределенности при составлении прогноза или оценки некоторые методы заменяют неопределенную переменную одним средним числом. Вместо этого моделирование Монте-Карло использует несколько значений, а затем усредняет результаты. Моделирование методом Монте-Карло берет переменную, имеющую неопределенность, и присваивает ей случайное значение. Затем модель запускается и выдается результат. Этот процесс повторяется снова и снова, присваивая много разных значений рассматриваемой переменной. После завершения моделирования результаты усредняются, чтобы получить оценку.

Как сказано выше, основной целью методов Монте-Карло является оценка ожидаемого значения μ рандомизированного алгоритма A . Основным недостатком метода является то, что оценка μ до аддитивной ошибки ε с вероятностью успеха 99 % требует $n = O(\sigma^2 / \varepsilon^2)$ повторений независимо от размерности

пространства выборки. Это означает, что если мы хотим сохранить вероятность успеха на уровне 99 % и уменьшить аддитивную ошибку ε в 10 раз, то нам нужно увеличить количество итераций в 102 раза. Представьте, что мы хотим оценить μ до четырех цифр. Нам потребуется выполнить A более 100 миллионов раз. Здесь на помощь приходят квантовые вычисления. Число использований A может быть уменьшено почти в четыре раза по сравнению с классическим значением. Результат будет основан на оценке амплитуды. Идея заключается в том, что у нас есть случайная переменная X , принимающая значения в подмножестве χ из R_d для некоторого измерения d . Случайная величина X имеет плотность вероятности f и обычно существует функция $\Phi: \chi \rightarrow R+$. Методы Монте-Карло стремятся аппроксимировать

$$\mu = E[\Phi(X)] = \int_{\chi} \Phi(x) f(x) dx. \quad (20)$$

Для этого производится соответствующее количество N независимых и одинаково распределенных выборок, каждая из которых соответствует независимому выполнению A . Затем среднее выборочное значение $\bar{\mu}$ используется в качестве аппроксимации μ .

Для проверки нашей гипотезы используем алгоритм с использованием случайной выборки с ограниченной вариативностью. В этом случае ускорение алгоритма может быть достигнуто при комбинировании классического неравенства Чебышева и квантового ускорения алгоритма 25. Наличие границы вариативности $v(A)$ означает, что

$$V_{ar}(v(A)) = E\left[\left(v(A) - E[v(A)]\right)^2\right] \leq \sigma^2. \quad (21)$$

Чтобы получить желаемый результат, нам также потребуется масштабировать и сдвигать интересующие нас случайные переменные, представляющие интерес. Начнем со случайной величины X , распределенной согласно некоторому распределению со значением μ_x и стандартным отклонением σ_x . Всякий раз, когда мы масштабируем случайную величину на коэффициент λ , мы получаем случайную величину $Z = \lambda X$ с новым распределением со средним $\mu_z = \lambda \mu_x$ и стандартным отклонением $\sigma_z = \lambda \sigma_x$. Если сдвинуть случайную величину на скаляр k , то получим случайную величину $Z = X + k$ с новым распределением со средним $\mu_z = \mu_x + k$ и стандартным отклонением $\sigma_z = \sigma_x$.

Первым шагом нашего алгоритма является выполнение алгоритма $A' = A / \sigma$, полученного путем масштабирования A с $\lambda = 1 / \sigma$. Таким образом, $v(A')$ будет случайной величиной со средним значением и стандартным отклонением, ограниченным $\mu' \leq \mu / \sigma$ и $\sigma' \leq 1$ соответственно.

Наличие стандартного отклонения порядка единицы означает, что выход $\tilde{m}$ от выполнения алгоритма A' с высокой вероятностью довольно близок к фактическому среднему значению μ . Это объясняется неравенством Чебышева.

Поэтому мы можем с высокой степенью уверенности предположить, что $|\tilde{m} - \mu'| \leq 3$. Вторым шагом – рассмотреть алгоритм B , который получается путем выполнения A' и сдвига вычитанием $\tilde{m}$. Случайная величина $v(B)$ имеет ограничение на норму ℓ_2 .

Действительно:

$$\begin{aligned} \|v(B)\|_2 &= E[v(B)^2]^{1/2} = \\ &= E\left[\left((v(A') - \mu') + (\mu' - \tilde{m})\right)^2\right]^{1/2} \leq E\left[(v(A') - \mu')^2\right]^{1/2} + E\left[(\mu' - \tilde{m})^2\right]^{1/2} = \\ &= \sigma' + E\left[(\mu' - \tilde{m})^2\right]^{1/2} \leq 4. \end{aligned} \quad (22)$$

Эта граница также может быть определена как $\|v(B)/4\|_2 \leq 1$.

Таким образом, получим алгоритм Монте-Карло с ограниченной дисперсией, в котором $V_{ar}(v(A)) \leq \sigma^2$ для некоторых известных σ с точностью ε , которая $\varepsilon < 4\sigma$, вычисляющий $E[v(A)]$:

1. Зададим $A' = A / \sigma$.
2. Запустим A' один раз и обозначим $\tilde{m}$ как результат.
3. Зададим B как производный алгоритм по выполнению A' и вычитанию $\tilde{m}$.
4. Применим шаг 2 к алгоритмам $-B_{<0} / 4$ и $B_{<0} / 4$ с точностью $\varepsilon / (32\sigma)$ и вероятностью отказа $1/9$ для произведения оценки $\tilde{\mu}^-, \tilde{\mu}^+$ из $E[v(-B_{<0} / 4)]$ и $E[v(B_{<0} / 4)]$ соответственно.
5. Зададим $\tilde{\mu} = \tilde{m} - 4\tilde{\mu}^- + 4\tilde{\mu}^+$.
6. Результат $\sigma\tilde{\mu}$.

Проверка с использованием пакета средств разработки Microsoft Quantum (QDK) [15] показала возможность построения вероятностной модели входных параметров факторинговых операций в режиме реального времени, а значит, и использования данного метода при построения автоматизированных информационных систем поддержки принятия факторинговых решений.

Заключение

В статье рассмотрены количественные показатели по использованию факторинговых финансовых инструментов компаниями на российском рынке за последние три года, явно указывающие на значительную и с каждым годом возрастающую роль этого продукта как функции по управлению финансами предприятия. С учетом возрастающей нагрузки на информационные системы, обеспечивающие автоматизацию данного процесса, а также отсутствия возможности использования вероятностных моделей входных параметров от рейтинговых агентств эффективное использование и развитие АИС управления процессом факторинга на предприятиях в будущем невозможно без применения методов оптимизации классических алгоритмов. Возможность высокой параллелизации исполняемых процессов с помощью использования, наряду с классическими алгоритмами, квантовых вычислений говорит о высокой перспективе данной тематики для повышения эффективности рассматриваемой функции управления

предприятием. Вместе с тем при разработке стоит учитывать показанные особенности применения параллелизации квантовых вычислений, а значит, результирующий алгоритм должен будет использовать квантовые вычисления лишь в тех случаях, где возможно использование их преимуществ перед классическими. В ходе исследования нами была предложена вариация квантового алгоритма Монте-Карло, адаптированная к использованию в целях поддержки принятия факторинговых решений, с ограниченной дисперсией, проведена проверка полученного алгоритма с использованием QDK на языке Q# и показана возможность их использования при построении автоматизированных информационных систем поддержки принятия факторинговых решений, что дополнит существующие АИС и позволит избежать ручного вмешательства кредитных специалистов в автоматизированный процесс. Показанный результат позволяет улучшить систему поддержки принятия факторинговых решений за счет комбинирования классических и квантовых вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глухарева С.В. Управление организацией (предприятием). Томск: В-Спектр, 2014. 41 с.
2. Ассоциация факторинговых компаний. Информационный обзор рынка факторинга по итогам 2019 года. М.: АФК, 2020. 30 с.
3. Ассоциация факторинговых компаний. Информационный обзор рынка факторинга по итогам 2020 года. М.: АФК, 2021. 13 с.
4. Ассоциация факторинговых компаний. Информационный обзор рынка факторинга по итогам 2021 года. М.: АФК, 2022. 40 с.
5. Копыльцов А.А., Копыльцов А.В. От парадигмы императивного программирования к парадигме квантовых вычислений и далее // Современное программирование: Материалы III Международной научно-практической конференции. Нижневартовск: НВГУ, 2021. С. 8–9.
6. Амбарян Т.Р. Параллельные вычисления в нейронных и квантовых сетях // Труды СПИИРАН. Вып. 1. Т. 3. СПб.: СПИИРАН, 2003. С. 62–64.
7. Феоктистова М.В. Математическая модель квантового компьютера // Материалы Десятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона». Т. 1. Иркутск: ИГУПС, 2019. С. 280–284.
8. Djordjevic I.B. Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction (Second Edition) // Academic Press, 2021. P. 251–286.
9. Parekh R., Ricciardi A., Darwish A., DiAdamo S. Quantum Algorithms and Simulation for Parallel and Distributed Quantum Computing // 2nd International Workshop on Quantum Computing Software, 2021. P. 3–6. doi:10.48550/arXiv.2106.06841.
10. Suzuki Y., Uno S., Raymond R., Tanaka T., Onodera T., Yamamoto N. Amplitude estimation without phase estimation // Quantum Information Processing. Vol. 19, no. 2. P. 1–17, 2020.
11. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, USA, IEEE Computer Society Press, 1994. P. 124–134.
12. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. SIAM J. Computing 26, 1997. P. 1484–1509.
13. Barlett S. Lecture on quantum computing // NITP Summer School, Adelaide, Australia, 2003.
14. Мясников А.А. Анализ данных в управлении рисками факторинга // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. Саратов: Научная книга, 2018. С. 224–227.
15. Azure Quantum documentation. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/> (accessed April 20, 2023).

Статья поступила в редакцию 07 апреля 2023 г.

QUANTUM COMPUTING IN AUTOMATED INVOICE FACTORING CONTROL SYSTEMS

R.O. Boryaev, A.V. Chuvakov*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: r.boryaev@gmail.com, avch2105@gmail.com

Abstract. *The aim of this paper is to describe existing approaches to automation in enterprise management systems of invoice factoring operations. The relevance of this problem is estimated by the volume and dynamics of growth of the invoice factoring market in the Russian Federation. The existing performance problems inherent in software built on the basis of classical algorithms are considered, and their optimization by using quantum algorithms is proposed. Attention is focused on the problem of parallel computing as the main feature, which allows to achieve a significant increase in computing power. Possible way of solution, based on the joint use of quantum and classical approach within one software complex is given. Application of quantum Monte Carlo method for the purpose of improvement of the automated information system of the enterprise is described. The received result allows to draw a conclusion about perspective of use of the given technique for construction of the combined quantum and classical algorithms in systems of management of factoring operations.*

Keywords: *automated informational systems, invoice factoring, quantum computing, parallel computing, cubit, superposition, quantum Monte Carlo method.*

REFERENCES

1. Glukhareva S.V. Upravleniye organizatsiy [Organizational management]. Tomsk: V-Spectr, 2014. 40 pp. (In Russian)
2. Invoice factoring company association, Informacionniy obzor rynka faktoringa po itogam 2019 goda [Informational overview of invoice factoring market by results of 2019]. M.: AFK, 2020. 30 pp. (In Russian)
3. Invoice factoring company association, Informacionniy obzor rynka faktoringa po itogam 2020 goda [Informational overview of invoice factoring market by results of 2020]. M.: AFK, 2021. 13 pp. (In Russian)
4. Invoice factoring company association, Informacionniy obzor rynka faktoringa po itogam 2021 goda [Informational overview of invoice factoring market by results of 2021]. M.: AFK, 2022. 40 pp. (In Russian)
5. Kopilcov A.A., Kopilcov A.A. Ot paradigmy imperativnogo programmirovaniya k paradigme kvantovykh vychislenij i dale [From paradigm of imperative programming to paradigm of quantum computing and further] // Sovremennoe programmirovaniye: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhnevartovsk: NVGU, 2021. Pp. 8–9. (In Russian)
6. Abramian T.R. Parallelnye vychisleniya v nejronnykh i kvantovykh setyah [Parallel computations in neuron and quantum networks] // SPIIRAN Works. Vol. 1, b. 3. Spb.: SPIIRAN, 2003. Pp. 62–64 (In Russian)
7. Feoktistova M.V. Matematicheskaya model' kvantovogo komp'yutera [Math model of quantum computer] // Sibirskiy region transportnaya infrastruktura. Vol. 1. Irkutsk: IGUPS, 2019. P. 280–284. (In Russian)
8. Djordjevic I.B. Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction (Second Edition) // Academic Press, 2021. P. 251–286.



© The Author(s), 2023

*Rodion O. Boryaev, Postgraduate Student.

Aleksandr V. Chuvakov (Ph.D. (Chem.)), Associate Professor.

9. *Parekh R., Ricciardi A., Darwish A., DiAdamo S.* Quantum Algorithms and Simulation for Parallel and Distributed Quantum Computing // 2nd International Workshop on Quantum Computing Software, 2021. Pp. 3–6. doi:10.48550/arXiv.2106.06841
10. *Suzuki Y., Uno S., Raymond R., Tanaka T., Onodera T., Yamamoto N.* Amplitude estimation without phase estimation // Quantum Information Processing. 2020. Vol. 19, no. 2. P. 1–17.
11. *Shor P.W.* Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, USA, IEEE Computer Society Press, 1994. Pp. 124–134.
12. *Shor P.W.* Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // SIAM J. Computing 26, 1997. Pp. 1484–1509.
13. *Barlett S.* Lecture on quantum computing // NITP Summer School, Adelaide, Australia, 2003.
14. *Myasnikov A.A.* Analiz dannyh v upravlenii riskami faktoringa [Data Analysis in the Management of Risks of a Factoring Company] // Mathematical and computer modeling in economics, insurance and risk management: Science book. Saratov, 2018. Pp. 224–227. (In Russian)
15. Azure Quantum documentation. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/> (accessed April 20, 2023).

Original article submitted 07.04.2023

УДК 004.942

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Е.Е. Волхонская*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: lizaveta5.6@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оптимального назначения автономных транспортных средств на выполняемые производственные процессы. Проведение виртуальных испытаний для организации прогнозного технического обслуживания предполагает создание цифровых двойников, основой которых являются имитационные модели. Решение задачи назначений, описанной в статье, является базой для построения имитационных моделей на сетях Петри для анализа динамики производственно-логистической системы. Рассмотрена структура агропромышленной системы уборки зерновых комплексом комбайнов с использованием автономных транспортных средств на базе автомобилей КАМАЗ. Определено множество характеристик производственно-логистической системы: площади и урожайность полей, производительность комбайнов, грузоподъемность и скорость автомобилей и др. Сформулирована задача минимизации эксплуатационных затрат для комплекса автомобилей при заданном распределении комбайнов по полям с зерновыми культурами. Задача относится к целочисленному линейному программированию с булевыми переменными. Отличие постановки данной задачи состоит в формировании ряда ограничений, учитывающих основные параметры производственно-логистической системы. Рассмотрен пример оптимизации распределения автономных транспортных средств при заданном количестве полей и обрабатываемых их комбайнов. Полученное решение позволяет определить набор готовых для эксплуатации автомобилей, а также сформировать резерв автомобилей для снижения простоев. Решение предложенной задачи может быть положено в основу структуры имитационной модели в составе цифрового двойника производственно-логистической системы. Также методика может применяться при текущем планировании реальных работ комбайнов и автомобилей.

Ключевые слова: системный анализ, целочисленное линейное программирование, задача назначения, имитационное моделирование, автономные автомобили, зерноуборочные комбайны.

Введение

Современное направление развития промышленности базируется на концепции «Индустрия 4.0» [1], в рамках которой проводится создание производственно-логистических систем с автономными и беспилотными транспортными средствами. Одна из важнейших задач – организация прогнозного технического об-



© Автор(ы), 2023

* Елизавета Евгеньевна Волхонская, аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».

служивания (ТО) [2, 3]. Это становится возможным, так как автономные транспортные средства имеют развитые бортовые измерительные системы и средства удаленного мониторинга технических состояний. В то же время для таких сложных и дорогих технических объектов построение систем технического обслуживания должно проектироваться еще на этапе виртуального запуска в эксплуатацию [4]. Виртуальные испытания с использованием цифровых двойников дают возможность заранее выявить проблемы и сформулировать задачи ТО [5]. Большое значение имеет управление резервом автономных транспортных средств и использование стратегии «каннибализации» для оперативной замены дефектных узлов [6, 7].

В рамках проекта создания роботизированных агротехнических автомобилей КАМАЗ [8] был применен подход, основанный на разработке комплекса системных моделей. В такой комплекс входят задача оптимизации структуры производства и имитационные модели производственного процесса [5]. Для построения имитационных моделей на первом этапе анализа решается задача назначения транспортных средств по заданному критерию. Полученное решение является базовым при формировании структуры имитационной модели.

Рассматриваемая системная задача назначения транспортных средств на обслуживание производственных объектов и процессов носит общий характер и может быть применена при анализе сложных логистических систем. В настоящей статье проведено исследование распределения роботизированных агротехнических автомобилей для вывоза зерна с полей во время уборки.

1. Модель производственно-транспортных операций в логистической системе агропромышленного предприятия

На рисунке представлена общая структура производственно-логистической системы, в которую входят:

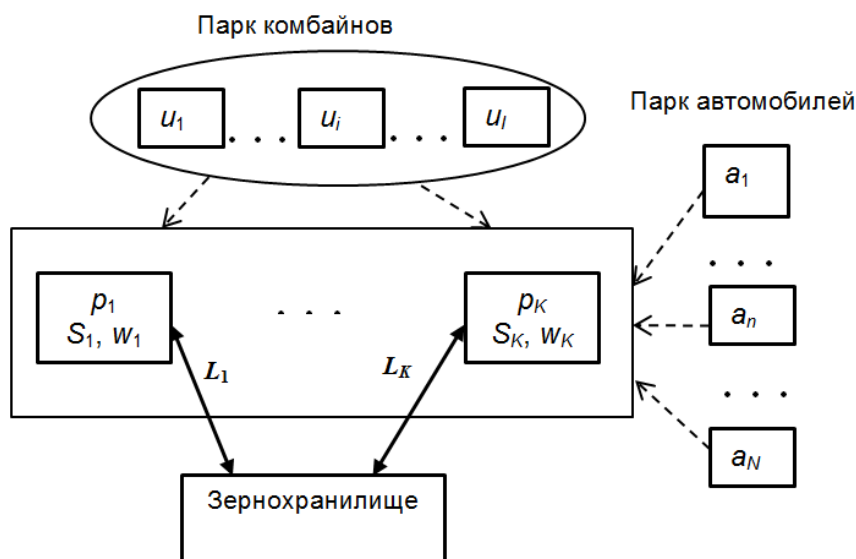
- парк беспилотных комбайнов $U = \{u_1, ..., u_l, ..., u_l\}$ [9];
- парк автономных автомобилей на базе шасси КАМАЗ $A = \{a_1, ..., a_n, ..., a_N\}$ [10];
- множество обрабатываемых полей $P = \{p_1, ..., p_k, ..., p_K\}$;
- множество маршрутов между зернохранилищем и полями $L_1, ..., L_K$.

Парк автономных автомобилей A состоит из трех групп:

- множество активных автомобилей A^A , находящихся в эксплуатации и выполняющих работы на полях;
- множество резервных автомобилей A^R , прошедших техническое обслуживание или ремонт и готовых к эксплуатации;
- множество каннибализируемых автомобилей A^C , предназначенных для снятия агрегатов и узлов и установки на активные автомобили [7].

При этом $A = A^A \cup A^R \cup A^C, A^R \cap A^C = \emptyset$.

Задача назначения беспилотных комбайнов на поля в данной статье не рассматривается для простоты изложения предлагаемого подхода. Следует отметить, что описанная далее методика применима и к решению задачи назначения комбайнов для работы на полях по уборке урожая.



Структура агротехнической производственно-логистической системы

Введем следующие обозначения переменных и параметров:

- 1) S_k – площадь поля k , га;
- 2) w_k – урожайность зерна на поле k , ц/га;
- 3) Pf_i – производительность комбайна i , назначенного на поле k , т/час.

Производительность зависит от средней скорости комбайна, ширины жатки, урожайности зерна на данном поле;

- 4) T_k – заданное время уборки поля k , час;
- 5) L_k – расстояние от поля k до зернохранилища, км;
- 6) v_{sn} – средняя скорость автономного автомобиля n при передвижении по маршруту «Поле – Зернохранилище», км/час;
- 7) V_n^A – объем кузова автомобиля n , м³;
- 8) V_i^U – объем бункера комбайна i , м³;
- 9) β – коэффициент пересчета объема зерна определенного сорта в тонны, т/м³;
- 10) B_A – количество автомобилей, готовых к эксплуатации и доступных к назначению на поля, при этом $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$, где A – множество автономных автомобилей, A^R и A^C – множества резервных и каннибализируемых автомобилей соответственно.

Далее определяются основные соотношения, связывающие параметры процесса уборки зерна с характеристиками комбайнов и автономных автомобилей.

1. Масса зерна в тоннах, выращенного на поле k площади S_k с учетом коэффициента допустимых потерь δ при уборке, равна

$$M_k = (1 - \delta) S_k w_k / 10.$$

Масса зерна на поле k , которую можно убрать комбайном i за время T_k

$$M_{ki}(T) = Pf_i \times T_k.$$

С другой стороны, время T_{ki} , необходимое для полной уборки поля k комбайном i , определяется как

$$T_{ki} = (1 - \delta) S_k w_k / 10 P f_i.$$

2. Время цикла на маршруте вида «Загрузка на поле – Выгрузка в зернохранилище – Возврат на поле» одного автомобиля n для поля k равно $2L_k / v_{sn}$, час.

Максимальное количество циклов движения одного автомобиля n к комбайну i на поле k за период T_k :

$$\eta_{kn} = [T_k / (2L_k / v_{sn} + T_b)],$$

где T_b – время выгрузки зерна в зернохранилище.

Масса зерна, вывозимого за период T_k одним автомобилем n с поля k :

$$M_{kn} = \beta \eta_{kn} V_n^A.$$

2. Постановка задачи оптимального назначения автономных автомобилей для выполнения работ на полях

Рассматривается минимизация эксплуатационной стоимости работы автомобилей в производственно-логистической агропромышленной системе. Булеву переменную оптимизационной задачи определим так:

$$x_{kn} = \begin{cases} 1 - & \text{если для выполнения работы на поле } k \text{ назначен} \\ & n\text{-й автономный автомобиль,} \\ 0 - & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Как отмечено выше, считается, что решена задача назначения комбайнов на поля при условии, что на одно поле назначается только один комбайн. В результате известна функция соответствия $i = \Theta(k)$.

Теперь решается задача оптимального назначения автомобилей на работу с комбайнами на полях.

Целевая функция C – общая стоимость эксплуатации автономных автомобилей при выполнении работ на заданном множестве полей [11]:

$$C = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{kn} x_{kn} \right\}, \quad (2)$$

где $c_{kn} = 2\eta_k L_k (c_{kn}^e + s\varphi_n)$ – суммарная стоимость выполнения производственных операций автономным автомобилем n на поле p_k ; c_{kn}^e – удельные затраты на ТО, руб/км; φ_n – расход топлива автомобилем n , л/км; s – стоимость топлива, руб/л.

Ограничения задачи имеют вид:

1) назначение каждого автономного автомобиля a_n на одно и только одно поле p_k :

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad n = \overline{1, N}, \quad (3)$$

другой вариант: назначение автономного автомобиля возможно не более чем на одно поле (в том числе возможно отсутствие назначения):

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq 1, \quad n = \overline{1, N},$$

2) назначение на каждое поле p_k не менее одного автономного автомобиля:

$$\sum_{n=1}^N x_{kn} \geq 1, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4)$$

3) назначение на все поля не более доступного количества автомобилей B_A :

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{kn} \leq B_A, \quad (5)$$

4) масса зерна, выгружаемого комбайном i из бункера в автомобиле на поле k за период T_k , должна быть не больше суммарной массы, которую могут вывезти обслуживающие автомобили за этот период:

$$\sum_{n=1}^N \eta_{kn} \beta (V_n^A - V_i^U) x_{kn} \geq 0, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \Theta(k), \quad (6)$$

где Θ – функция соответствия номера назначенного комбайна i заданному полю k , η_{kn} – число циклов поездок, выполняемых каждым автомобилем за время T_k ;

5) масса зерна, которую могут вывезти автомобили с поля k за период T_k , должна быть не меньше массы зерна, обработанного комбайном i за этот период:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq 1, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \Theta(k). \quad (7)$$

6) максимальный перемещаемый объем кузовов автомобилей за время T_k не должен превышать объем убранного зерна более чем в α раз, где коэффициент α показывает степень суммарной недогруженности автомобилей:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \leq \alpha, \quad \alpha > 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Можно также рассматривать коэффициент загрузки кузовов автомобилей, равный $\gamma = 1/\alpha$.

В результате решения оптимизационных задач (2) – (8) получаем булеву матрицу X назначений автономных автомобилей на работы, которые задаются календарно-сетевым графиком G .

Полученное решение определяет структуру работ и статическое распределение ресурсов, но не описывает динамику процессов в режиме эксплуатации в условиях значительной неопределенности внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств. Эти исследования проводятся на имитационных моделях на стохастических сетях Петри, описанных в работах [12, 13].

3. Пример оптимизации назначения автомобилей на множество полей

В качестве примера сформулирована и решена задача назначения при следующих исходных данных: а) число полей $K=4$; б) количество комбайнов $I=4$; в) количество автономных автомобилей $N=12$.

Предположим, что имеются следующие типы комбайнов и автомобилей:

1. Два типа комбайнов [14–16], каждому комбайну соответствует индивидуальный номер:

- Тип 1 – TORUM 785, номера {1; 2};
- Тип 2 – CLAAS LEXION 580, номера {3; 4},
- 2. Три модели автономных автомобилей [17] с индивидуальными номерами:
 - KAMAZ-6520-49, номера {1; 2; 3; 4; 5};
 - KAMAZ-65115-42, номера {6; 7; 8; 9};
 - KAMAZ-65111-48, номера {10; 11; 12}.

В табл. 1 и 2 приведено распределение комбайнов по полям и их характеристики. Для простоты принято, что на одном поле работает только один комбайн. При расчетах приняты следующие значения коэффициентов: $\beta = 0,77$ т/м³ и $\delta = 2\%$. При определении времени уборки поля принято, что выгрузка автомобиля в зернохранилище $T_b = 0,5$ час. В табл. 3 содержатся параметры автомобилей КАМАЗ трех моделей.

Таблица 1

Параметры полей

Номер k	Площадь S_k , га	Урожайность w_k , ц/га	Длина маршрута L_k , км	Масса убираемого зерна M_k , т	Время уборки T_k , час
1	122	22	12,5	263	16,5
2	250	19,2	5	470	29,4
3	360	25,4	8,8	900	45
4	480	16,8	10,4	790	39,5

Таблица 2

Параметры комбайнов, назначенных на поля

Тип комбайна	Номер i	Номер поля k	Производительность Pf_i , т/час	Объем бункера V_i^U , м ³
Тип 1	1	3	20	12,3
Тип 1	2	4	20	12,3
Тип 2	3	1	16	10,5
Тип 2	4	2	16	10,5

Таблица 3

Параметры автономных автомобилей

Модель	Номер n	Объем кузова V_n^A , м ³	Средняя скорость v_n , км/час	Расход топлива, л/км	Удельная стоимость ТО, руб/км
KAMAZ 6520	1; 2; 3; 4; 5	20	27	0,29	8,1
KAMAZ 65115	6; 7; 8; 9	10	30	0,26	6,9
KAMAZ 65111	10; 11; 12	8,2	30	0,25	5,7

В табл. 4 приведены значения эксплуатационных расходов C_{kn} (руб.) различных моделей автомобилей, соответствующих назначениям на разные поля. От номера поля зависят в первую очередь число циклов поездок, расход топлива на маршруте и суммарные эксплуатационные издержки.

Таблица 4

Эксплуатационные расходы при использовании автономных автомобилей на различных полях, руб.

Модель	Поле p_1		Поле p_2		Поле p_3		Поле p_4	
	η_1	C_{1n}	η_1	C_{2n}	η_3	C_{3n}	η_4	C_{4n}
KAMAZ 6520	11	5895	33	7075	39	14716	31	13824
KAMAZ 65115	12	5658	35	6601	41	13609	33	12945
KAMAZ 65111	12	5160	35	6020	41	12411	33	11806

4. Решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными

Преобразуем двухмерную матрицу значений искомым булевых переменных x_{kn} в одномерный массив x_j . При $k=4$ и $n=12$ имеем вектор $(x_1, x_2, \dots, x_{48})$. Тогда задача назначения имеет вид:

– целевая функция:

$$C_{\min} = \min \sum_{j=1}^{48} C_j x_j,$$

где C_j – суммарные эксплуатационные затраты для j -го назначения автономных автомобилей.

Соответственно ограничения (3)–(8) также приводятся к одномерной форме.

Решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными выполнялось с использованием пакета Lpsolve 5.5 [18]. Задача имеет 48 неизвестных булевых переменных и 25 ограничений.

В результате решения получен вектор $X = (x_2, x_{10}, x_{11}, x_{13}, x_{27}, x_{30}, x_{40}, x_{41})$ булевых переменных, равных единице. При этом получен минимум эксплуатационных затрат в размере 79 263 руб. Соответствующие назначения раскрыты в табл. 5.

Таблица 5

Распределение автономных автомобилей по полям

Номер поля	Комбайны	Автомобили $C_{\min} = 79\,263$ руб.			
		x_j	x_{kn}	Номер автомобиля	Модель
1	CLAAS LEXION 580	x_2	$x_{1,2}$	2	KAMAZ 6520
		x_{10}	$x_{1,10}$	10	KAMAZ 65111
		x_{11}	$x_{1,11}$	11	KAMAZ 65111
2	CLAAS LEXION 580	x_{15}	$x_{2,1}$	1	KAMAZ 6520
3	TORUM 785	x_{27}	$x_{3,3}$	3	KAMAZ 6520
		x_{30}	$x_{3,6}$	6	KAMAZ 65115
4	TORUM 785	x_{40}	$x_{4,4}$	4	KAMAZ 6520
		x_{41}	$x_{4,5}$	5	KAMAZ 6520

Коэффициент недогруженности автомобилей был принят $\alpha = 1,25$. Увеличение α до значения 1,4 приводит к непроизводительному перемещению зерна автомобилями (в этом случае обеспечивается только 70 % загруженности кузовов). В то же время при уменьшении α до значения 1,2 решение отсутствует. Это вы-

звано невыполнением ограничения (6) и свидетельствует о превышении количества убираемого комбайнами зерна над вывозимым объемом назначенных автомобилей.

Согласно полученному решению на полях будут эксплуатироваться восемь автомобилей из 12. Оставшиеся четыре автомобиля могут быть использованы следующим образом:

- а) все четыре автомобиля направлены в резерв;
- б) часть автомобилей будет служить для каннибализации, остальные – в резерве.

Заключение

Предложенная постановка задачи оптимизации распределения автотранспортных средств отличается введением ограничений, учитывающих интенсивность работы комбайнов и скорость выгрузки зерна, а также технические характеристики автономных автомобилей. Дальнейшее развитие задачи предполагается провести в направлении решения проблем:

- назначения на одно поле нескольких комбайнов;
- перевода освободившихся автомобилей на другие поля по мере полной уборки полей меньшей площади;
- учета потерь от простоя автомобилей в резерве или в качестве каннибализуемых единиц.

Получаемое решение является основой для разработки имитационных моделей на временных раскрашенных сетях Петри, позволяющих проводить анализ случайных факторов, влияющих на техническое состояние транспортных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chachada A. et al.* Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
2. *Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F.* Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
3. *Щербаков М.В., Сай Ван К.* Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
4. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
5. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию // Математические методы в технологиях и системах. 2021. № 1. С. 148–153.
6. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67–88.
7. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Модель стратегии каннибализации при техническом обслуживании роботизированных автомобилей // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 1. С. 52–56.
8. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (044032).

9. Agrotrend. 9 проектов комбайнов-беспилотников. URL: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespilotnikov/> (дата обращения 20.04.2023).
10. ТракХолдинг. Самосвал КАМАЗ 65119-7915-5F АРГО (ЕВРО 5). URL: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (дата обращения 21.04.2023).
11. *Белый В.С.* Оценка экономической эффективности модернизации парка грузовых автомобилей «Камаз-65117» // Вестник МФЮА. 2022. № 1. С. 144–153.
12. *Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А.* Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств // Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета). 2021. № 58(84). С. 98–104.
13. *Орлов С.П., Сусарев С.В.* Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Вып. 30(4). С. 49–75.
14. Ростсельмаш. Зерноуборочные комбайны TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/> (дата обращения 20.4.2023).
15. CLAAS. Зерноуборочные комбайны LEXION. URL: <https://www.claas.ru/produktsiya/zyernouborochnyye-kombajny/lexion-8700-7600#lexion-8000> (дата обращения 20.04.2023).
16. *Ломакин С.* Зерноуборочные комбайны: потребности покупателей, предложения производителей // Аграрное обозрение. 2010. URL: <https://agroobzor.ru/sht/a-143.html> (дата обращения 10.04.2023).
17. КАМАЗ. Продукция. URL: <https://kamaz.ru/production/serial/#samosvaly> (дата обращения 19.04.2023).
18. Lpsolver. Introduction to lp_solve 5.5.2.11. URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5> (дата обращения 12.04.2023).

Статья поступила в редакцию 11 мая 2023 г.

THE PROBLEM OF OPTIMAL ASSIGNMENT OF AUTONOMOUS VEHICLES IN PRODUCTION-LOGISTICS SYSTEM

*E.E. Volhonskaya**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: lizaveta5.6@mail.ru

Abstract. *The problem of optimal assignment of autonomous vehicles to ongoing production processes is considered. Virtual testing for predictive maintenance involves the creation of digital twins based on simulation models. The solution of the assignment problem described in the article is the basis for building simulation models on Petri nets to analyze the dynamics of the production- logistics system. The structure of the agro-industrial system of grain harvesting by a complex of combines using autonomous vehicles based on KAMAZ vehicles is considered. Many characteristics of the production-logistics system have been determined: field areas and productivity, productivity of combines, carrying capacity and speed of vehicles, etc. The problem of minimizing operating costs for a complex of vehicles for a given distribution of combines over fields with grain crops has been formulated. The problem relates to integer linear programming with Boolean variables. The difference in the formulation of this problem lies in the formation of a number of restrictions that take into account the main parameters of the production-logistics system. An example of optimizing the distribution of autonomous vehicles for a given number of fields of harvesters processing them is considered. The resulting solution allows you to determine the set of vehicles ready for operation, as well as form a reserve of vehicles to reduce downtime. The solution of the proposed problem can be used as the basis for the structure of the simulation model as part of the digital twin of the production and logistics system. Also, the technique can be used in the current planning of real work of combines and vehicles.*

Keywords: *system analysis, integer linear programming, assignment problem, simulation modeling, autonomous vehicles, combine harvesters.*

REFERENCES

1. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
2. Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
3. Shcherbakov M.V., Sai Van K. Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoobiektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 [The architecture of the system of predictive maintenance of complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0] // Programmnye produkty i sistemy. 2020. No. 2. Pp. 186–194. (In Russian)
4. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.



© The Author(s), 2023

* Elizaveta E. Volhonskaya, Postgraduate Student.

5. *Volkhonskaia E.E., Orlov S.P.* Modelirovanie sistemy avtonomnykh transportnykh sredstv v protsesse virtualnogo zapuska v ekspluatatsiiu [Modeling an autonomous vehicle system during a virtual commissioning process] // *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike*. 2021. No. 1. Pp. 148–153. (In Russian)
6. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 189. P. 67–88.
7. *Volkhonskaia E.E., Orlov S.P.* Model strategii kannibalizatsii pri tekhnicheskome obsluzhivani robotizirovannykh avtomobilei [Model of cannibalization strategy in the maintenance of robotic vehicles] // *Sovremennaya nauka: Aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2023. No. 1. Pp. 52–56. (In Russian)
8. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (044032).
9. Agrotrend. 9 proektov kombainov-bespilotnikov [9 drone harvester projects]. URL: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespilotnikov/> (accessed April 20, 2023). (In Russian)
10. TrakKHolding. Samosval KAMAZ 65119-7915-5F ARGO (EVRO 5). URL: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (accessed April 21, 2023). (In Russian)
11. *Belyi V.S.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti modernizatsii parka gruzovykh avtomobilei Kamaz-65117 [Assessment of the economic efficiency of the modernization of the fleet of trucks "Kamaz-65117"] // *Vestnik MFUA*. 2022. No. 1. Pp. 144–153. (In Russian)
12. *Susarev S.V., Orlov S.P., Bizyukova E.E., Uchaikin R.A.* Primenenie modelei na setiakh Petri pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia avtonomnykh agrotekhnicheskikh transportnykh sredstv [Application of models on Petri nets in the organization of maintenance of autonomous agricultural vehicles] // *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gos. tekhnolog. instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2021. No. 58(84). P. 98–104. (In Russian)
13. *Orlov S.P., Susarev S.V.* Imitatsionnye modeli na setiakh Petri dlia analiza protsessov obsluzhivaniia i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Simulation models on Petri nets for the analysis of maintenance and repair processes of complex technical systems] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2022. 30(4). Pp. 49–75. (In Russian)
14. Rostselmash. Zernouborochnye kombainy TORUM 785 [Rostselmash. Combine harvesters TORUM 785]. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785> (accessed April 20, 2023). (In Russian)
15. CLAAS. Zernouborochnye kombainy LEXION [CLAAS. Combine harvesters LEXION]. URL: <https://www.claas.ru/produksiya/zyernouborochnyye-kombajny/lexion-8700-7600#lexion-8000> (accessed April 20, 2023). (In Russian)
16. *Lomakin S.* Zernouborochnye kombainy: potrebnosti pokupatelei, predlozheniia proizvoditelei [Combine harvesters: customer needs, manufacturers' offers] // *Agrarnoe obozrenie*. 2010. URL: <https://agroobzor.ru/sht/a-143.html> (accessed April 10, 2023). (In Russian)
17. KAMAZ. Produktsiia [KAMAZ. Products]. URL: <https://kamaz.ru/production/serial/#samosvaly> (accessed April 19, 2023). (In Russian)
18. Lpsolver. Introduction to lp_solve 5.5.2.11. URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5> (accessed April 12, 2023).

Original article submitted 11.05.2023

УДК 681.5.015

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА**И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков, Д.С. Лысенко***

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, dmitry-lusenko@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается опыт разработки и идентификации модели водогрейного котла-утилизатора как объекта с распределенными параметрами. Котел-утилизатор представлен как теплообменный аппарат с перекрестными потоками взаимодействующих сред. В качестве математической модели нагрева потока воды с переменной скоростью выступает гиперболическое уравнение первого порядка. С помощью спектрального метода распределенных систем получено представление объекта в виде разложения в ряд по ортонормированному базису, что позволило получить решение в виде векторно-матричной модели пространства состояний. Представление в пространстве состояний используется для реализации модели в пакете моделирования динамических систем. Расчет температуры нагревателя базируется на уравнении энергетического баланса. Температура стенки разделителя сред определяется тепловыми потоками между выхлопными газами, стенкой и нагреваемой водой. Температура стенки принята постоянной по всей длине теплообменного аппарата. В статье приведена структурная схема модели, учитывающая взаимное влияние температур стенки и нагреваемого потока воды. Поток тепла от выхлопных газов рассчитан непосредственно по известным параметрам выхлопных газов на входе и выходе котла-утилизатора. По конструктивным параметрам теплообменного аппарата определены динамические характеристики процесса теплообмена. Данные, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора, используются для идентификации коэффициента теплопередачи между стенками теплообменного аппарата и потоком воды. Результат идентификации коэффициента теплообмена согласуется со справочными данными. В статье приведены графики исходных данных, результатов моделирования. Показано, что максимальное рассогласование модели и реальных данных не превышает двух градусов, а средняя абсолютная ошибка составляет менее 0,2 градуса.



© Автор(ы), 2023

* Иван Александрович Данилушкин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Сергей Александрович Колпащиков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

Дмитрий Сергеевич Лысенко, аспирант кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00521, <https://rscf.ru/project/23-29-00521/>, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Ключевые слова: котел-утилизатор, объект с распределенными параметрами, модель, спектральный метод, Simulink, S-функция, идентификация, поток с переменной скоростью, пространство состояний.

Введение

Эффективность функционирования автоматической системы управления во многом зависит точности и адекватности модели объекта управления. При разработке системы управления теплообменным аппаратом необходимая точность модели достигается за счет учета пространственной распределенности процесса, что обусловлено значительной площадью поверхности конвекции [1].

Моделирование пространственно-распределенного процесса теплопередачи чаще всего осуществляется с помощью двух принципиально разных подходов: численных методов с применением конечно-элементных моделей и аналитических методов, базирующихся на точных решениях уравнения теплопроводности. Применение обоих подходов наталкивается на трудности, связанные со значимой неопределенностью физических параметров процесса теплопередачи. Повышение сложности математической модели, учет дополнительной информации о специфике технологического процесса зачастую приводят на следующий уровень неопределенности, для разрешения которой необходимо проведение непосредственных измерений физических характеристик материалов взаимодействующих сред.

В описанной ситуации для оценки физических характеристик могут использоваться балансовые модели – уравнения энергетического и материального баланса, которые позволяют рассчитать характеристики в стационарных режимах функционирования объекта с последующим использованием полученных значений при расчете динамических характеристик процесса теплопередачи. Более того, адекватная динамическая модель может быть идентифицирована по результатам пассивного эксперимента и в дальнейшем использоваться для синтеза систем управления.

В работе рассматривается задача реализации динамической модели в пакете MATLAB® Simulink®, описывающей поведение котла-утилизатора водогрейного КУВ-24-114 производства ЗАО «Энергомаш (Белгород)-БЗЭМ». Котел предназначен для нагрева сетевой воды за счет использования тепла горячих выхлопных газов газотурбинной установки ГТЭС-16ПА. Котел представляет собой теплообменный аппарат с перекрестным движением потоков воды и выхлопных газов. Система автоматического управления обеспечивает регистрацию температуры и давления выхлопных газов на входе и выходе котла, температуры и расхода воды на входе и температуры на выходе котла. Модель должна обеспечивать расчет температуры воды на выходе при известных остальных параметрах функционирования котла.

Вопросы моделирования динамических процессов в теплообменных аппаратах широко обсуждаются в современных источниках. В [2] приводится обзор методов, использующихся при решении задач теплопередачи для движущихся потоков. Наиболее популярными являются сеточные методы, которые характеризуются автором как методы с высокой вычислительной стоимостью. Поэтому их использование неэффективно при решении задач управления сложными технологическими процессами. Эти методы обычно используются для получения точных результатов, на базе которых проводится идентификация и валидация упрощенных моделей. В [3] для идентификации модели теплообменного аппарата, полу-

ченного аналитическими методами, используется FEMLAB-модель. В [4, 5] применен метод конечных элементов для исследования статических и динамических режимов теплообменных аппаратов. В [6] задача получения передаточных функций для противоточного теплообменного аппарата с постоянной скоростью потоков решена методом термоэлектрической аналогии.

Часто для моделирования теплообменных аппаратов различных конструкций используется метод конечных объемов в комбинации с другими подходами, обеспечивающими повышение точности. В [6] исследуется точность и скорость моделирования пластинчатого теплообменника в зависимости от количества элементов элементарного объема. В [7] сравнивается поведение моделей теплообменных аппаратов, полученных с помощью метода конечных объемов и с помощью метода движущейся границы. Авторы делают выводы, что метод движущейся границы требует меньше вычислительных ресурсов по сравнению с методом конечных объемов. В [8] проводится исследование термодинамических свойств системы аккумуляции тепла. Для моделирования применяется метод конечных объемов. Полученная модель используется для оптимизации параметров системы.

Для решения задач синтеза автоматических систем управления особый интерес представляют модели, полученные аналитическими методами [3, 9], т. е. анализ аналитического решения позволяет предложить структуру регулятора. Идентификация таких моделей требует собственного математического аппарата. Так, в работах [10, 11] представлены специальные методы параметрической идентификации объектов, описанных уравнением теплопроводности.

При использовании аналитических методов для моделирования теплообменных аппаратов температурное распределение потока часто описывается гиперболическим уравнением первого порядка, поскольку в большинстве случаев можно пренебречь неоднородностью температуры по сечению потока, а скорость потока существенно превышает скорость распространения тепла вдоль оси движения потока.

Передаточные функции для прямоточных и противоточных теплообменных аппаратов как объектов с распределенными параметрами, полученные с помощью методов структурной теории распределенных систем, представлены в качестве примера в монографии А.Г. Бутковского [12]. Представление противоточных теплообменников в виде двусвязной системы сосредоточенных передаточных функций по каналам «температура потоков на входах» – «температура потоков на выходах» получено в работе [13]. В [14] предложено решение, позволяющее реализовать двухсвязную систему в пакете моделирования динамических систем MATLAB® Simulink®. Использование аналитических решений, полученных в [12–14], ограничено постоянной скоростью движения потоков. Поэтому отдельный интерес представляет численно-аналитический подход, обеспечивающий разработку адекватных моделей теплообмена потоков энергоносителей, учитывающий параметрические возмущения, такие как изменение скорости потоков, коэффициентов теплопередачи.

В [15] при моделировании процесса нагрева потока с переменной скоростью используется структурное представление аналитического решения для потока с постоянной скоростью, реализуемое с помощью звена запаздывания. Показано, что с помощью звена с переменным запаздыванием может быть создана модель, обеспечивающая практически необходимую точность описания процесса нагрева потока с переменной скоростью.

Более универсальным кажется подход, предложенный В.А. Ковалем в [16], который основан на спектральном представлении распределенных систем: при разложении дифференциального уравнения в частных производных по базису ортонормированных функций уравнение представляется в виде бесконечномерной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Применение спектрального представления при моделировании потока с переменной скоростью исследовалось в [17]. В [18] на базе спектрального представления распределенных систем представлено законченное решение для моделирования процесса нагрева потока с переменной скоростью и его реализация в пакете MATLAB[®] Simulink[®]. Решение оформлено в виде S-функции [19] и учитывает изменение основных параметров процесса нагрева потока: скорости, коэффициента теплообмена, температуры на входе и температуры нагрева.

Разработанная в [18] S-функция используется ниже для построения Simulink-модели котла-утилизатора.

Математическая модель котла-утилизатора

Поведение температурного распределения потока воды $\theta(l, t)$ в трубке теплообменника описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta(l, t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial \theta(l, t)}{\partial l} + \beta(t) \theta(l, t) = \beta(t) T_{cm}(l, t), \quad 0 \leq l \leq L, \quad t > 0 \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$\theta(l, 0) = \theta_0(l), \quad \theta(0, t) = g(t). \quad (2)$$

Здесь $T_{cm}(l, t)$ – температура стенки; $\beta(t)$ – приведенный коэффициент теплообмена, учитывающий величину коэффициента теплопередачи между материалом стенки и водой, площадь конвективного теплообмена и конструктивные особенности теплообменника; $v(t)$ – скорость потока воды; L – общая длина трубки теплообменника; $\theta_0(l)$ – начальное распределение температуры; $g(t)$ – функция изменения температуры воды на входе теплообменника.

Температура стенки принята одинаковой по всей длине теплообменника. Она определяется исходя из уравнения теплового баланса:

$$\frac{dT_{cm}(t)}{dt} = \frac{(Q_c(t) - Q_g(t))}{m_{cm} c_{cm}}, \quad (3)$$

$$Q_c(t) = c_g F_g(t) \Delta T_c(t), \quad \Delta T_c(t) = T_{c2}(t) - T_{c1}(t), \quad (4)$$

$$Q_g(t) = c_g F_g(t) (\theta(L, t) - \theta(0, t)), \quad (5)$$

где $Q_c(t)$ – тепловой поток от газа к стенке теплообменника; $Q_g(t)$ – тепловой поток от стенки к воде; m_{cm} – масса стенки; c_{cm} – теплоемкость материала стенки; c_g , c_g – теплоемкости выхлопных газов и воды соответственно; $F_g(t)$, $F_g(t)$ – массовые расходы выхлопных газов и воды; $T_{c1}(t)$, $T_{c2}(t)$ – температура выхлопных газов до и после теплообменника.

В [18] для спектрального представления распределения температуры $\theta(l, t)$ в виде вектора $\Phi_\theta = [\varphi_\theta(h, t)]_{\infty \times 1}$ используется базис ортонормированных функций $P_0(l) = [P(h, l)]_{\infty \times 1}$:

$$\theta(l, t) = \sum_{h=1}^{\infty} P(h, l) \Phi_{\theta}(h, t) = \mathbf{P}_0^T(z) \mathbf{\Phi}_{\theta}; \quad (6)$$

$$P(h, l) = \sqrt{2} \sin\left(\frac{(2h-1)\pi l}{2L}\right), \quad h=1, 2, \dots; \quad (7)$$

$$\Phi_{\theta}(h, t) = \int_0^L \theta(\xi, t) P(h, \xi) d\xi, \quad h=1, 2, \dots \quad (8)$$

Частная производная по пространственной координате $\partial\theta(l, t)/\partial l$ имеет спектральное представление [16]

$$\frac{\partial\theta(l, t)}{\partial l} = \mathbf{P}_1 \mathbf{\Phi}_{\theta} + \mathbf{\Gamma}_0, \quad (9)$$

где $\mathbf{P}_1 = [P_1(h, \bar{h})]_{\infty \times \infty}$ – матрица операционного дифференциала первого порядка [16], компоненты которой определяются как

$$P_1(h, \bar{h}) = \int_0^L P(\bar{h}, \xi) \left(\frac{\partial P(h, \xi)}{\partial \xi} \right) d\xi, \quad h=1, 2, \dots, \quad \bar{h}=1, 2, \dots, \quad (10)$$

а вектор $\mathbf{\Gamma}_0 = [\varphi_g(h, t)]_{\infty \times 1}$ учитывает ненулевые граничные условия [16].

Уравнение (1) при нулевых граничных условиях $g(t)=0$ в спектральном представлении имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{\Phi}_{\theta}}{\partial t} = \mathbf{K}_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{\Phi}_{\theta} + \mathbf{K}_2 \mathbf{\Phi}_{\theta} + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{\Phi}_T, \quad (11)$$

где $\mathbf{K}_1 = -\nu(t)\mathbf{E}$, $\mathbf{K}_2 = -\beta(t)\mathbf{E}$, $\mathbf{K}_3 = \beta(t)\mathbf{E}$, $\mathbf{E}$ – единичная диагональная матрица.

Компоненты матрицы $\mathbf{\Phi}_T = [\varphi_T(h, t)]_{\infty \times 1}$ вычисляются для $T_{cm}(l, t)$ аналогично (8).

Система линейных уравнений (11) используется для реализации модели пространства состояний температуры на выходе теплообменника. Матрицы представления в пространстве состояний рассчитываются на базе ограниченного первыми N членами бесконечного ряда (7).

Учет ненулевых граничных условий выполнен за счет участка дополнительного нагрева в начальной части нагревателя $[0, d]$ с температурой нагрева T_g . Выражение для расчета температуры T_g получено из уравнения для установившегося режима следующим образом. Если рассмотреть режим при значениях параметров $\beta(t) = \beta_c = \text{const}$, $\nu(t) = \nu_c = \text{const}$, $g(t) = g_c = \text{const}$ и нулевой температуре стенки, $T_{cm}(l, t) = 0$, то

$$\theta(l, \infty) = g_c \exp(-\beta_c l / \nu_c). \quad (12)$$

Для случая, когда температура на входе равна нулю $g(t) = 0$, а температура стенки задана выражением

$$T_{cm}(l, t) = \begin{cases} T_g, & \text{при } l \leq d; \\ 0, & \text{при } l > d, \end{cases} \quad (13)$$

температура на участке $l > d$ в установившемся режиме будет определяться выражением

$$\theta(l, \infty) = T_g \exp(-\beta_c l / v_c) (\exp(-\beta_c d / v_c) - 1), \quad l > d. \quad (14)$$

Из равенства (12) и (14) получено выражение для расчета температуры на участке дополнительного нагрева:

$$T_g = g_c \frac{1}{\exp(-\beta_c d / v_c) - 1}. \quad (15)$$

При реализации S -функции принято допущение, что температура на участке дополнительного нагрева для переходных режимов рассчитывается также согласно выражению (15):

$$T_g(t) = g(t) \frac{1}{\exp(-\beta(t)d/v(t)) - 1}. \quad (16)$$

Реализация и исследование модели в MATLAB® SIMULINK®

Для применения S -функции sfFlowHeating из [18] при создании модели котла-утилизатора необходимо реализовать расчет температуры стенки, а также приведенной скорости потока, поскольку S -функция sfFlowHeating реализована для теплообменника с приведенной длиной трубки $L_{np} = 1$.

Масса стенки теплообменника m_{cm} может быть рассчитана исходя из характеристик теплообменника котла-утилизатора (см. таблицу).

Характеристики теплообменника котла-утилизатора

Характеристика	Значение
Трубы:	
– диаметр, мм	38
– толщина стенки, мм	3
– материал	сталь марки 20К-18
Расположение труб	шахматный порядок
Поперечный шаг труб, мм	110
Продольный шаг труб, мм	75
Количество труб в одном ряду	20
Число рядов в одном ходе	4
Количество ходов	6
Длина хода, мм	5000
Оребрение труб:	
– высота, мм	16
– толщина, мм	1
– шаг, мм	4

По данным таблицы рассчитана масса стали теплообменника $m_{cm} = 19\,500$ кг, внутренний объем теплообменника (по воде) – $2,123 \text{ м}^3$. Площадь поверхности теплообмена по воде составляет $241,6 \text{ м}^2$. Площадь поверхности теплообмена по выхлопным газам – 3544 м^2 .

Теплоемкость уходящих газов c_g принята равной $1,074 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ [20].

Теплоемкость стали $c_{cm} = 0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Теплоемкость воды $c_g - 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Разработанная Simulink-модель котла-утилизатора представлена рис. 1. Температура стенки рассчитывается с помощью блока-интегратора, на вход которого подается разность тепловых потоков, согласно (3). Поток тепла от выхлопных газов рассчитывается при постоянном массовом расходе $F_g(t) = 182 \text{ т/час}$, при изменяющейся разности температур $\Delta T_g(t)$. Поток тепла в воду рассчитывается исходя из данных по расходу воды на входе котла-утилизатора, разности температур на входе и на выходе теплообменника. На вход S-функции `sfFlowHeating` подаются (сверху вниз на рис. 1): температура воды на входе теплообменника, $g(t)$; температура стенки теплообменника, $T_{cm}(t)$; приведенная скорость потока воды, $v_{np}(t)$; приведенный коэффициент теплообмена $\beta(t)$. Приведенная скорость потока воды рассчитывается согласно выражению

$$v_{np}(t) = \frac{v(t)}{L} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\rho_g F_g(t)}{S} = \frac{\rho_g}{V_{TO}} F_g(t), \quad (17)$$

где S – суммарная площадь сечения всех трубок теплообменника; ρ_g – плотность воды; V_{TO} – внутренний объем теплообменника. Физический смысл приведенной скорости потока – это величина, обратная транспортному запаздыванию.

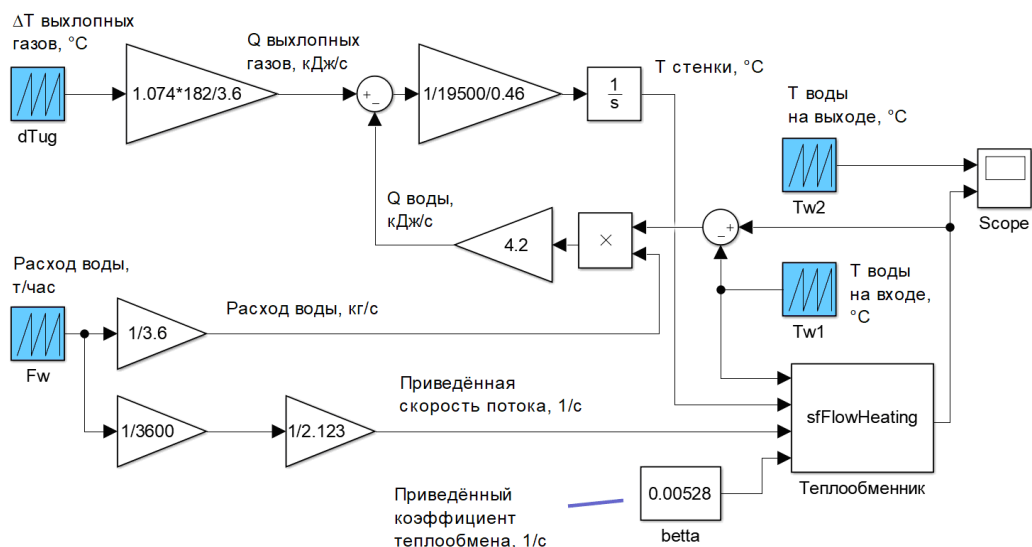


Рис. 1. Simulink-модель котла-утилизатора

Для определения значения приведенного коэффициента теплообмена $\beta(t) = \text{const}$ (переменная `beta`) использовались реальные данные, которые подавались на входы Simulink-модели: перепад температуры выхлопных газов $\Delta T_g(t)$ (переменная `dTug`), массовый расход воды $F_g(t)$ (переменная `Fw`), температура воды на входе теплообменника $g(t)$ (переменная `Tw1`). Значение коэффициента получено в результате решения задачи минимизации:

$$\int_0^{t_{\text{кон}}} |\theta(L, t) - T_{\theta 2}(t)| dt \rightarrow \min_{\beta}, \quad (18)$$

где $T_{\theta 2}(t)$ – реальные данные о температуре воды на выходе котла-утилизатора (переменная Tw2).

Приведенный коэффициент теплообмена равен $\beta(t) = 0,00528 \text{ с}^{-1}$, что соответствует коэффициенту конвективного теплообмена «стенка – вода» $\alpha_{\theta} = 354,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Коэффициент конвективного теплообмена между выхлопными газами и поверхностью нагрева исходя из величины теплового потока и площади поверхности теплообмена равен $\alpha_{\theta} = 30,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Оба значения согласуются с оценками [21].

На рис. 2 приведены данные, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора. Данные использовались для идентификации модели. Газотурбинная установка, от которой поступают выхлопные газы на вход котла-утилизатора, работает в номинальном режиме с максимальной нагрузкой. Расход выхлопных газов постоянен. Температура воды на входе практически не изменяется, расход воды изменяется в существенном диапазоне от 400 до 720 т/час, что соответствует изменению приведенной скорости потока от 0,053 до 0,093 1/с или изменению транспортного запаздывания в диапазоне от 10,8 до 18,9 с. Анализ графиков позволяет заметить, что температура воды на выходе существенно зависит от расхода воды.

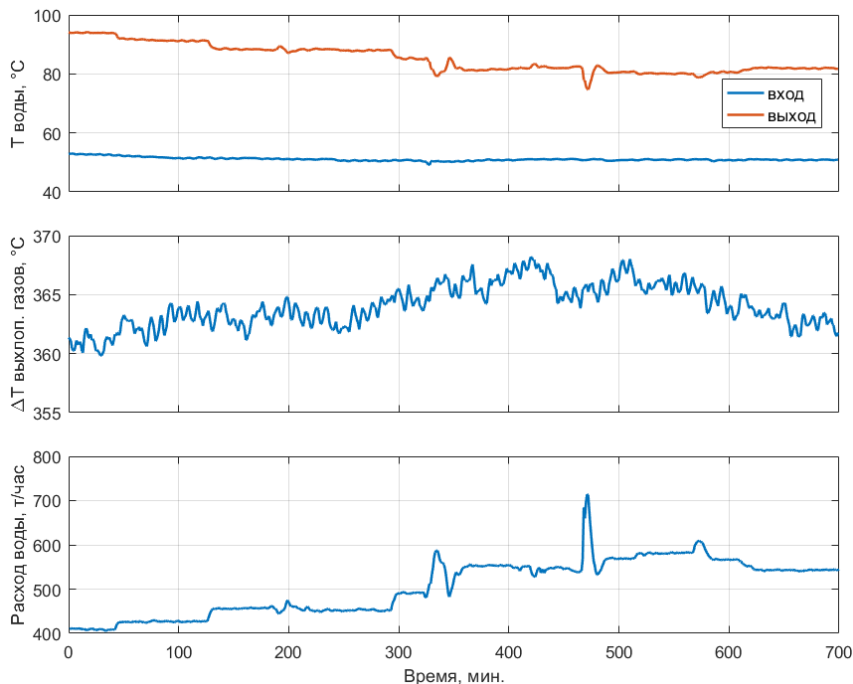


Рис. 2. Изменение технологических параметров в процессе эксплуатации котла-утилизатора

На рис. 3 приведены результаты моделирования работы котла-утилизатора при полученном в процессе идентификации значении коэффициента теплообме-

на. При исследовании Simulink-модели (см. рис. 1) настроечные параметры S -функции `sfFlowHeating` имели следующие значения: $N=10$, $d=0,4$. Модель обладает высокой точностью: средняя абсолютная ошибка (MAE) составляет $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соизмеримо с классами допуска современных термометров сопротивления. Максимальное отклонение модели от реальных данных составляет $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

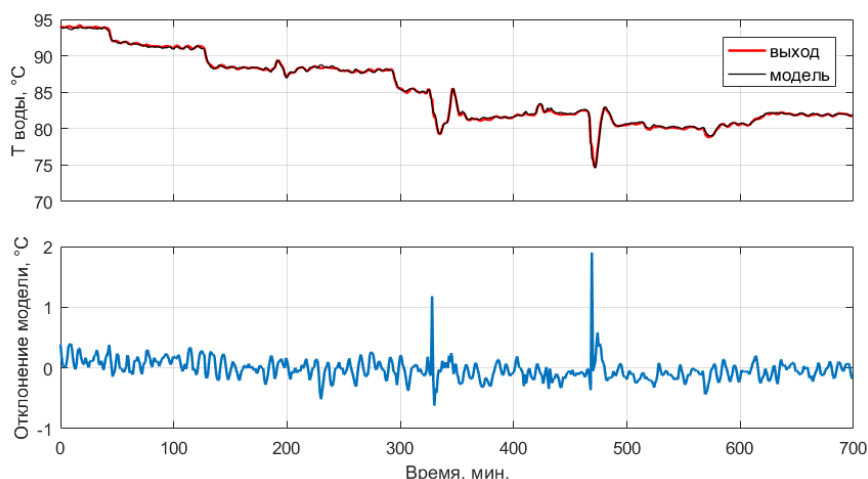


Рис. 3. Поведение модели котла-утилизатора

Заключение

Разработанная модель котла-утилизатора показала высокую точность, что говорит об адекватности использованного математического аппарата решаемой задаче. Полученная модель может использоваться для синтеза и оценки эффективности систем автоматического управления температурой воды на выходе котла-утилизатора.

Используемый подход может быть реализован в любом пакете компьютерного моделирования динамических систем, поддерживающем представление модели объекта в пространстве состояний.

К преимуществам полученной модели следует отнести высокую точность и сравнительно невысокую вычислительную стоимость этапа моделирования. Подобный подход к реализации моделей может использоваться при создании цифровых двойников теплообменных аппаратов и решении задач пассивной идентификации параметров по данным, полученным на этапе эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. ред. Г.А. Филиппова, Ф.Ф. Пащенко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 448 с.
2. Hosain M.L. Fluid Flow and Heat Transfer Simulations for Complex Industrial Applications: From Reynolds Averaged Navier-Stokes towards Smoothed Particle Hydrodynamics, PhD dissertation, Mälardalen University, Västerås, 2018.
3. Hadad W.A., Maillot D., Jannot Yves. Modeling unsteady diffusive and advective heat transfer for linear dynamical systems: A transfer function approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 115, part A, 2017. Pp. 304–313.
4. Judt W., Ciupek B., Urbaniak R. Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber // Energy. Vol. 196, 2020, 117093.

5. *Marchionni M., Chai L., Bianchi G., Tassou S.A.* Numerical modelling and transient analysis of a printed circuit heat exchanger used as recuperator for supercritical CO₂ heat to power conversion systems // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 161, 2019, 114190.
6. *Michel A., Kugi A.* Accurate low-order dynamic model of a compact plate heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 61, 2013. Pp. 323–331.
7. *Vaupel Y., Huster W.R., Holtorf F., Mhamdi A., Mitsos A.* Analysis and improvement of dynamic heat exchanger models for nominal and start-up operation // *Energy*. Vol. 169, 2019. Pp. 1191–1201.
8. *Zhang C., Zhang X., Qiu L., Zhao Y.* Thermodynamic investigation of cascaded latent heat storage system based on a dynamic heat transfer model and DE algorithm // *Energy*. Vol. 211, 2020, 118578.
9. *Men Y., Liu X., Zhang T.* Analytical solutions of heat and mass transfer process in combined gas-water heat exchanger applied for waste heat recovery // *Energy*. Vol. 206, 2020, 118095.
10. *Дилигенская А.Н.* Альтернативный метод оптимизации в коэффициентной обратной задаче теплопроводности // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2014. № 4(44). С. 144–148.
11. *Дилигенская А.Н.* Решение ретроспективной обратной задачи теплопроводности на основе параметрической оптимизации // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 3. С. 399–406.
12. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. М., Наука, 1977. 320 с.
13. *Данилушкин И.А., Лежнев М.В.* Структурное представление процесса теплообмена при встречном направлении взаимодействующих потоков // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2007. № 1(19). С. 16–22.
14. *Данилушкин И.А., Снеговой В.В.* Структурное представление противоточного теплообменника в пакете численного моделирования динамических систем // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2009. № 1(23). С. 22–26.
15. *Данилушкин И.А.* Численно-аналитическая модель теплообмена для потока с переменной скоростью // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции (3–6 сентября 2019 г. Самара, Россия): в 2 т. / Под ред. С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой*. Самара: Офорт, 2019. Т. 1. С. 262–265.
16. *Коваль В.А.* Спектральный метод анализа и синтеза распределенных систем. Саратов: СГТУ, 2010. 145 с.
17. *Данилушкин И.А., Кавкаев К.В.* Моделирование температурного поля потока с переменной скоростью в SIMULINK // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2017. № 1(53). С. 174–178.
18. *Danilushkin I.* State-Space Model of Spatially Distributed Flow Heating with Time-Varying Parameters // *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russian Federation, 2023. Pp. 993–997. doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139082.
19. S-Function Concepts defined by The MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/s-function-concepts.html> (доступ от 15.05.2023).
20. *Уваров В.А., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю., Юдин А.И.* Методики расчета количества тепла в уходящих газах // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 8 (39). С. 121–124.
21. Dassault Systemes. Справка по SOLIDWORKS. Коэффициент конвективной теплопередачи. URL: https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm (доступ от 15.05.2023).

Статья поступила в редакцию 19 мая 2023 г.

DYNAMIC MODEL OF A WASTE HEAT BOILER

I.A. Danilushkin, S.A. Kolpashchikov, D.S. Lusenko*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, dmitry-lusenko@yandex.ru

Abstract. *The paper discusses the experience of developing and identifying a model of a waste heat boiler as a distributed parameters plant. The waste heat boiler is considered as a heat exchanger with cross flows of interacting media. The first order hyperbolic equation acts as a mathematical model of water flow heating with a variable rate. Using the spectral method of distributed systems, a representation of the problem is obtained in the form of an expansion into a series in an orthonormalized basis, which makes it possible to represent the solution in the form of a vector-matrix model of the state space. The state-space representation is used to implement the model in a dynamic systems simulation package. The heater temperature calculation is based on the energy balance equation. The temperature of the media separator wall is determined by the heat fluxes between the exhaust gas, the wall, and the heated water. The wall temperature is assumed to be constant along the entire length of the heat exchanger. The paper presents a block diagram of the model, which takes into account the mutual influence of the wall temperatures and the heated water flow. The heat flux from the exhaust gas is calculated directly from the known parameters of the exhaust gas at the inlet and outlet of the waste heat boiler. Based on the design parameters of the heat exchanger, the dynamic characteristics of the heat transfer process are determined. The data obtained during the operation of the waste heat boiler are used to identify the heat transfer coefficient between the walls of the heat exchanger and the water flow. The result of the heat transfer coefficient identification agrees with the reference data. The article presents graphs of the original data, simulation results. It is shown that the maximum mismatch between the model and real data does not exceed two degrees, and the mean absolute error is less than 0.2 degrees.*

Keywords: *waste heat boiler, distributed parameter plant, model, spectral method, Simulink, S-function, identification, variable speed flow, state space*

REFERENCES

1. Teplogidravlicheskiye modeli oborudovaniya elektricheskikh stantsiy [Thermal-hydraulic models of power plant equipment] / Endorsed by G.A. Filippova, F.F. Pashchenko. M.: FIZMAT-LIT, 2013. 448 pp. (In Russian)
2. Hosain M.L. Fluid Flow and Heat Transfer Simulations for Complex Industrial Applications : From Reynolds Averaged Navier-Stokes towards Smoothed Particle Hydrodynamics, PhD dissertation, Mälardalen University, Västerås, 2018.
3. Hadad W.A., Mailliet D., Jannot Yves. Modeling unsteady diffusive and advective heat transfer for linear dynamical systems: A transfer function approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 115, part A, 2017. Pp. 304–313.
4. Judt W., Ciupek B., Urbaniak R. Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber // Energy. Vol. 196, 2020, 117093.
5. Marchionni M., Chai L., Bianchi G., Tassou S.A. Numerical modelling and transient analysis of a printed circuit heat exchanger used as recuperator for supercritical CO₂ heat to power conversion systems // Applied Thermal Engineering. Vol. 161, 2019, 114190.



© The Author(s), 2023

* Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.
Dmitrij S. Lysenko, Postgraduate Student.

6. *Michel A., Kugi A.* Accurate low-order dynamic model of a compact plate heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 61, 2013. Pp. 323–331.
7. *Vaupel Y., Huster W.R., Holtorf F., Mhamdi A., Mitsos A.* Analysis and improvement of dynamic heat exchanger models for nominal and start-up operation // Energy. Vol. 169, 2019. Pp. 1191–1201.
8. *Zhang C., Zhang X., Qiu L., Zhao Y.* Thermodynamic investigation of cascaded latent heat storage system based on a dynamic heat transfer model and DE algorithm // Energy. Vol. 211, 2020, 118578.
9. *Men Y., Liu X., Zhang T.* Analytical solutions of heat and mass transfer process in combined gas-water heat exchanger applied for waste heat recovery // Energy. Vol. 206, 2020, 118095.
10. *Diligenskaya A.N.* Alternansnyj metod optimizacii v koefitsientnoj obratnoj zadache teploprovodnosti [Alternance optimization method in the coefficient inverse heat conduction problem] // Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki. 2014. № 4 (44). Pp. 144–148. (In Russian)
11. *Diligenskaya A.N.* Reshenie retrospektivnoj obratnoj zadachi teploprovodnosti na osnove parametricheskoj optimizacii [Solution of the retrospective inverse problem of heat conduction based on parametric optimization] // TVT. 2018. Vol. 56. № 3. P. 399–406. (In Russian)
12. *Butkovskiy A.G.* Strukturnaya teoriya raspredelennykh system [Structural theory of distributed systems]. M.: Nauka, 1977, 320 pp. (In Russian)
13. *Danilushkin I.A., Lezhnev M.V.* Strukturnoe predstavlenie processa teploobmena pri vstrechnom napravlenii vzaimodejstvuyushchih potokov [Structural representation of the heat transfer process in the opposite direction of interacting flows] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2007. № 1(19). Pp. 16–22. (In Russian)
14. *Danilushkin I.A., Snegovoy V.V.* Strukturnoe predstavlenie protivotochnogo teploobmennika v pakete chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh sistem [Structural representation of counter flow heat exchanger adapted to a software package for modeling dynamic systems] // Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki. 2009. № 1(23). Pp. 22–26. (In Russian)
15. *Danilushkin I.* A Numerical-Analytical Model of Heat Transfer for a Variable Rate Flow // XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019. Pp. 416–419.
16. *Koval' V.A.* Spektralnyi metod analiza i sinteza raspredelennykh system [Spectral method for analysis and synthesis of distributed systems]. Saratov: Izd-vo Sarat. gos. tekhn. un-ta, 2010, 148 pp. (In Russian)
17. *Danilushkin I.A., Kavkaev K.V.* Modelirovanie temperaturnogo polya potoka s peremennoy skorost'yu v SIMULINK [Simulation of the temperature field of flow with variable velocity in Simulink] // Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki. 2017. № 1(53). Pp. 174–178. (In Russian)
18. *Danilushkin I.* State-Space Model of Spatially Distributed Flow Heating with Time-Varying Parameters // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023. Pp. 993–997.
19. S-Function Concepts defined by The MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/s-function-concepts.html> (accessed May 15, 2023).
20. *Uvarov V.A., Staroverov S.V., Feoktistov A.Yu., Yudin A.I.* Methods for calculating the amount of heat in flue gases // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2015. no. 8(39). Pp. 121–124. (In Russian).
21. *Dassault Systemes. Spravka po SOLIDWORKS. Koeffitsiyent konvektivnoy teploperedachi* [Dassault Systemes. Help for SOLIDWORKS. Convective heat transfer coefficient] URL: https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm (accessed May 15, 2023). (In Russian).

Original article submitted 19.05.2023

УДК 004.42

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СИМУЛЯТОРА ДВИЖЕНИЯ И РАСХОЖДЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА

А.А. Дыда, И.И. Пушкарёв, А.Ф. Красавина*

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
Россия, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

E-mail: adyda@mail.ru, b_r_i_g88@mail.ru, ankrasmal.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос о разработке программного симулятора движения и расхождения безэкипажного судна, применение которого позволяет упростить процесс создания и тестирования безэкипажных судов. Приведены основные требования, предъявляемые к симулятору, его назначению, структуре и возможностям. Описана алгоритмическая основа разрабатываемого симулятора: подсистема удержания траектории использует алгоритм градиента вспомогательной функции, подсистема обхода препятствий реализована на методе скоростных препятствий, доработанного с учетом МППСС-72. Приведена общая логическая схема программы, которая содержит базовые подсистемы, элементы, обеспечивающие гибкость настройки симулятора и элементы для анализа результатов его работы. Рассмотрены наиболее распространенные в области робототехники языки программирования, выбран подходящий для разработки программного симулятора язык программирования C++. Показан графический интерфейс разработанной программы и основные его элементы. Для проверки работоспособности программного симулятора было проведено моделирование основных ситуаций расхождения: обгон, расхождение на встречных курсах и расхождение при пересечении курсов (препятствие справа или слева от БЭС). Представлены результаты данного моделирования. Созданный программный симулятор движения и расхождения безэкипажного судна соответствует поставленным к нему в работе требованиям, позволяет моделировать движение БЭС и при угрозе столкновения производить расхождение с препятствием по правилам МППСС-72. Реализация подсистем движения и расхождения как отдельных программных элементов дает возможность использовать их без значительных доработок в бортовых системах управления движением безэкипажных судов.

Ключевые слова: безэкипажное судно, расхождение, МППСС-72, программный симулятор, моделирование, язык программирования, система управления.



© Автор(ы), 2023

* Александр Александрович Дыда, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматические и информационные системы».

Игорь Игоревич Пушкарёв, аспирант кафедры «Автоматические и информационные системы».

Анна Фёдоровна Красавина, аспирант кафедры «Автоматические и информационные системы».

Введение

В современном мире безэкипажные суда (БЭС) становятся все более популярными, что обусловлено возможностью их применения в широком спектре задач в различных сферах. Они используются для мониторинга состояния окружающей среды, выполнения научных исследований, обеспечивают проведение подводных работ, выполняют спасательные и военные функции [1]. Перспективным направлением являются морские безэкипажные грузоперевозки [2, 3].

Однако разработка безэкипажных судов является сложной и дорогостоящей задачей. Она включает в себя проектирование судна, его изготовление, установку и настройку электроники и программного обеспечения, а также тестирование на воде. Все это требует больших затрат времени и ресурсов.

Для упрощения процесса разработки и тестирования безэкипажных судов программные симуляторы могут быть использованы для создания виртуальных моделей судов и их движения. Эти симуляторы могут быть настроены для воспроизведения различных маршрутов движения, погодных условий, морских течений, волнения и других факторов, которые могут повлиять на движение судна [4, 5].

С помощью программного симулятора разработчики могут тестировать различные сценарии без риска потери судна или нанесения ущерба окружающей среде. Они могут настроить различные параметры судна и его движения, чтобы определить оптимальные настройки для конкретных задач. Также использование программных симуляторов позволяет сократить затраты на разработку и тестирование безэкипажных судов, тем самым снизив их стоимость и время вывода в эксплуатацию.

Задача автоматического расхождения безэкипажного судна с подвижными или неподвижными препятствиями в соответствии с «Международными правилами предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72)» является одной из важнейших [6, 7]. Разработка программного симулятора движения и расхождения позволяет оценить работоспособность и эффективность применяемых алгоритмов и является важным шагом в разработке безопасных и эффективных безэкипажных судов, которые могут успешно выполнять задачи в различных областях.

Основные требования

Разрабатываемый симулятор предназначен в первую очередь для проверки алгоритма движения по заданной траектории и расхождения с представляющими опасность препятствиями в соответствии с МППСС-72. К моделированию динамических характеристик БЭС и подвижных объектов не предъявляется особых требований, и оно допускается в упрощенном виде.

Программный симулятор движения и расхождения безэкипажного судна является сложным инструментом, который должен соответствовать определенным требованиям для обеспечения возможности тестирования различных сценариев движения.

Важнейшим требованием к симулятору является разработка такой структуры программы, базовые элементы которой без изменений возможно использовать в программном обеспечении бортовых систем управления безэкипажных судов. К таким элементам можно отнести программные модули и функции, реализующие алгоритмическую часть движения и принятия решений при маневрах расхождения. Язык программирования также должен быть использован тот, кото-

рый далее планируется использовать в бортовой системе управления БЭС, или наиболее подходящий и распространенный в данном применении, в том числе позволяющий обрабатывать значительный объем данных и вычислений при ограниченных аппаратных ресурсах.

Симулятор должен обеспечивать гибкость в настройке параметров, таких как размеры и характеристики движения судов, маршруты движения и условия на море, чтобы пользователи могли создавать разнообразные ситуации для тестирования.

Возможности анализа результатов моделирования также являются базовым требованием. К таким возможностям можно отнести отображение траекторий движения и способ отображения или визуализации решений при выполнении маневров расхождения. Это поможет разработчикам и экспертам оценить работоспособность применяемых алгоритмов, доработать и улучшить их производительность.

Реализация

В качестве алгоритмической основы разрабатываемого симулятора используются способы движения и расхождения, предложенные в статье «Система управления движением и расхождением безэкипажного судна в соответствии с МППСС-72» [8].

В симуляторе реализована подсистема удержания траектории, основанная на алгоритме градиента вспомогательной функции [9]. Суть этого алгоритма заключается в формировании векторного поля – набора векторов, показывающих требуемое направления движения БЭС в конкретной точке. Ниже приведены обобщенные формулы для расчета требуемого курса БЭС при движении по заданному участку маршрута:

$$\begin{aligned}\psi_{set} &= \arctg 2 \left(\frac{dF_i}{dy_i} + \alpha w_{yi}, \frac{dF_i}{dx_i} + \alpha w_{xi} \right), \\ \text{grad} F_i &= (-a(ax_{usv} + by_{usv} + c), -b(ax_{usv} + by_{usv} + c)), \\ a &= (y_i - y_{i+1})\mu, \quad b = (x_i - x_{i+1})\mu, \quad c = (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)\mu, \\ \mu &= \pm \frac{1}{\sqrt{(y_i - y_{i+1})^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}}, \\ w_{xi} &= \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}, \\ w_{yi} &= \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}},\end{aligned}$$

где ψ_{set} – требуемый курс; F_i – функция, достигающая экстремума на i -ом участке маршрута [9]; (w_{xi}, w_{yi}) – вспомогательный вектор единичной длины, направленный вдоль траектории движения БЭС; α – весовой коэффициент, определяющий степень схождения векторного поля к заданному участку маршрута ($\alpha > 0$); a, b, c – некоторые действительные числа; (x_{usv}, y_{usv}) – текущие

координаты БЭС; (x_i, y_i) – путевые точки маршрута; μ – нормирующий множитель (берется по знаку, противоположному знаку c).

Необходимый маршрут движения БЭС задается путем создания набора путевых точек, последовательно соединенных прямыми линиями. Таким образом создается кусочно-линейный маршрут движения БЭС.

Подсистема обхода препятствий, используемая в симуляторе, обеспечивает вычисление безопасного курса и скорости БЭС для предотвращения столкновения с угрожающими препятствиями и соблюдения при этом правил МППСС-72. В ней применяется метод скоростных препятствий [10], доработанный с учетом требований МППСС-72 [8]. Для каждого возможного варианта курса и скорости рассчитывается стоимостная функция:

$$C = k_1 U_{i,j}^T U_{i,j} + k_2 F_{collision}(V_i, \psi_j) + k_3 F_{COLREG}(V_i, \psi_j),$$

$$U_{i,j} = \begin{bmatrix} V_{set} \cos(\psi_{set}) - V_i \cos(\psi_j) \\ V_{set} \sin(\psi_{set}) - V_i \sin(\psi_j) \end{bmatrix},$$

где k_1, k_2, k_3 – постоянные коэффициенты; $F_{collision}$ – логическая функция опасной ситуации [8]; F_{COLREG} – логическая функция МППСС-72 [8]; V_i, ψ_j – текущая скорость и курс БЭС; $U_{i,j}$ – вектор ошибки; V_{set}, ψ_{set} – заданная пользователем скорость и рассчитанный подсистемой удержания траектории курс.

Далее выбирается вариант курса и скорости с минимальным значением стоимостной функции, что будет соответствовать курсу и скорости БЭС, максимально близким к курсу подсистемы удержания траектории и заданной скорости и при этом позволяющим разойтись с препятствием, соблюдая правила МППСС-72.

Общая логическая схема программного симулятора показана на рис. 1.

Пользователь программного симулятора в полях настроек вводит параметры для расчета симуляции, включая коэффициенты, необходимые для работы подсистемы удержания траектории и подсистемы обхода препятствий, радиусы, описывающие БЭС и препятствия, требуемую скорость движения БЭС и заданные курсы и скорости движения препятствий. Маршрут движения БЭС задается интерактивным способом: пользователь активирует на панели инструментов режим создания путевых точек и отмечает их на виртуальной карте, точкам автоматически присваиваются порядковые номера, и они последовательно соединяются прямыми линиями, тем самым формируя маршрут движения.

Начальные положения БЭС и препятствий также задаются пользователем на карте интерактивно. Динамика безэкипажного судна (динамика изменения курса и скорости) в симуляторе реализована в упрощенной форме. Переход судна с одной скорости на другую определяется ускорением, задаваемым пользователем. Также задается угловая скорость для реализации изменения курса БЭС. При нажатии на кнопку начала симуляции производится выполнение алгоритмов подсистемы удержания траектории и подсистемы обхода препятствий, расчет и отрисовка перемещения безэкипажного судна и препятствий на карте.

Для анализа работы алгоритмов движения и расхождения в симуляторе предусмотрена функция отображения пройденной траектории БЭС и подвижных препятствий в течение заданного интервала времени. Также в отдельном окне

возможен вывод сетки вариантов курсов и скоростей с весовыми коэффициентами в графическом виде. Это позволяет оценить корректность работы алгоритма расхождения с угрожаемыми подвижными препятствиями в соответствии с МППСС-72 в реальном времени. Дополнительно возможен вывод рассчитываемых в реальном времени параметров, интересующих пользователя. Например, вывод дистанции и времени кратчайшего сближения БЭС с подвижным препятствием [11].

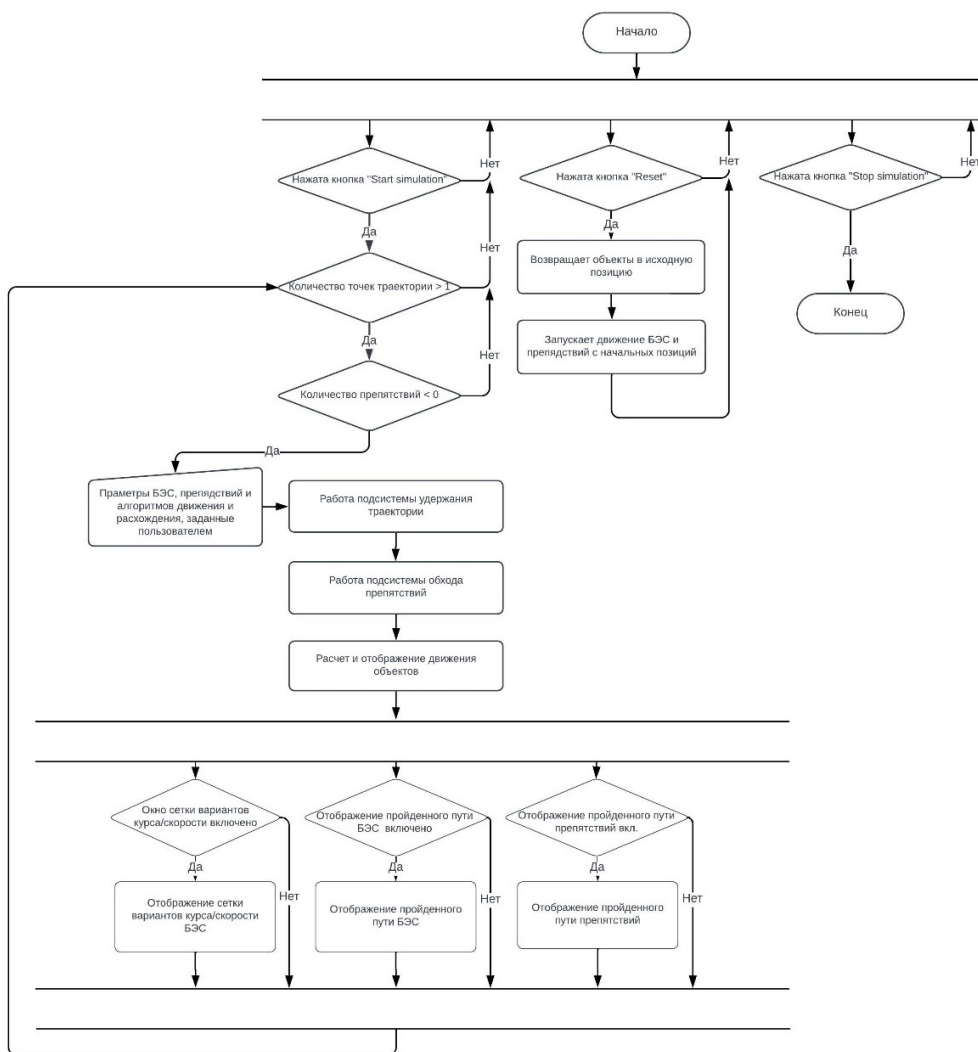


Рис. 1. Логическая схема программного симулятора движения и расхождения безэкипажного судна

Наиболее распространенными языками программирования в робототехнике, к которой в том числе можно отнести безэкипажные суда, являются MATLAB, Python, C++ [12, 13].

MATLAB [14] – это язык программирования, который часто используется в робототехнике для моделирования и анализа динамических систем. Он имеет богатую библиотеку инструментов для решения различных задач. MATLAB

больше ориентирован на математические расчеты и имеет ограниченные возможности для создания сложных систем управления. Также он может быть очень ресурсоемким при работе с большими объемами данных и вычислений, что может привести к проблемам с памятью и производительностью.

Python [15] широко используется в робототехнике для создания высокоуровневых систем управления, обработки изображений, анализа данных и машинного обучения. Python отличается простотой и легкостью в изучении и использовании. Основным его недостатком является невысокая скорость работы. Он является интерпретируемым языком, что означает, что его скорость выполнения ниже, чем у компилируемых языков. Это может быть проблемой при выполнении задач, требующих высокой производительности.

C++ [16] – один из наиболее популярных языков в робототехнике. C++ позволяет написать очень эффективный и быстрый код, что может быть важно для систем управления роботами с высокими требованиями к скорости и производительности. C++ является стандартным языком программирования для различных аппаратных платформ, что обеспечивает широкую совместимость и переносимость кода между различными системами. Недостатком C++ является его сложность. У него более сложный синтаксис и более сложные концепции, такие как управление памятью и указатели, что может затруднить разработку программ.

Исходным языком программирования для программного симулятора движения и расхождения безэкипажного судна выбран C++ как наиболее подходящий под требования к разработке. Для разработки графического интерфейса программы (рис. 2) используется Qt Framework [17] – кроссплатформенная библиотека разработки GUI на C++.

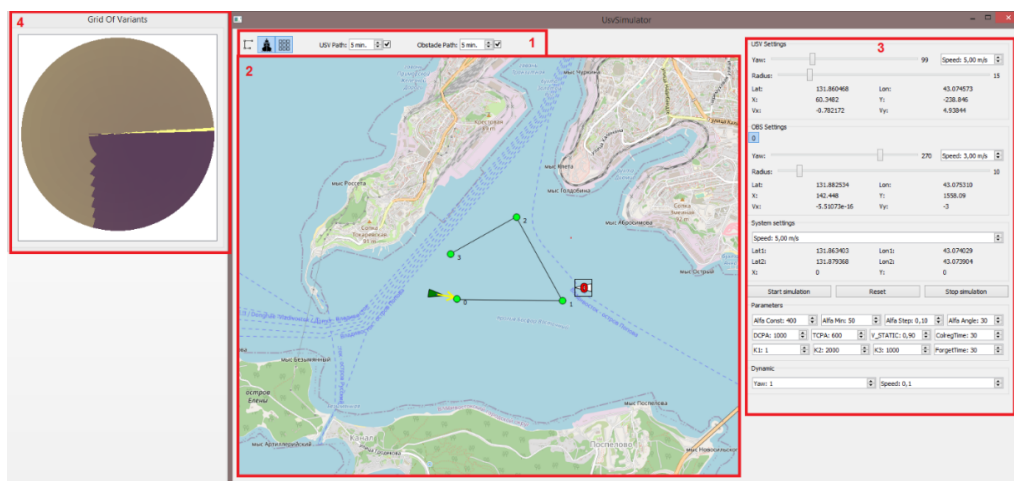


Рис. 2. Графический интерфейс программного симулятора (1 – панель инструментов; 2 – виртуальная карта с расположенными на ней БЭС, препятствием и заданным маршрутом движения БЭС; 3 – панель ввода параметров БЭС, препятствий и алгоритмов движения и расхождения; 4 – графическое отображение стоимостной функции сетки вариантов курсов и скоростей БЭС)

На рис. 3 более подробно продемонстрирована сетка вариантов, показывающая, какой курс и какую скорость выбирает БЭС в текущий момент времени.

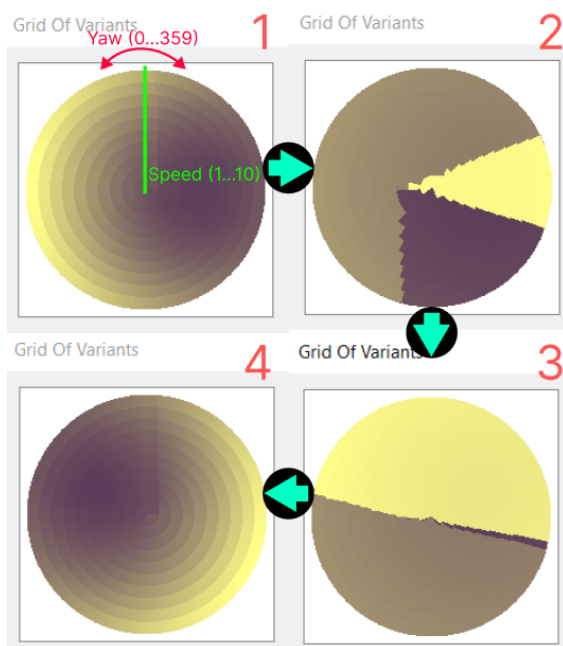


Рис. 3. Сетка вариантов курсов и скоростей безэкипажного судна

Представленная сетка вариантов показывает, какие области движения являются безопасными, а какие приводят к угрозе столкновения. Она представляет собой окружность, где градусная мера – курс движения судна, а радиус – скорость движения судна, как показано в области 1. Фиолетовые оттенки показывают области, которые являются приоритетными для БЭК, а желтые оттенки показывают области, которые приводят к угрозе столкновения, к нарушению правил МППСС-72 или к отклонению от траектории движения. Цвета определяются значением стоимостной функции, где наименьшее значение показывает наиболее подходящие курс и скорость движения безэкипажного судна.

Подсистемы удержания траектории и обхода препятствий реализованы в виде отдельных классов и функций, что позволяет использовать эти элементы программного обеспечения, отлаженного и оптимизированного в симуляторе, в дальнейшем в бортовом программном обеспечении систем управления безэкипажных судов.

Тестирование

Проверка работоспособности программного симулятора проводилась при моделировании основных ситуаций расхождения, регламентированных МППСС-72. К ним относятся: обгон, расхождение на встречных курсах и пересечение курсов [18]. Использовались следующие коэффициенты стоимостной функции: $k_1 = 1$, $k_2 = 2000$, $k_3 = 1000$.

На рис. 4 показана смоделированная ситуация расхождения БЭС с препятствием на встречных курсах. БЭС обходит подвижное препятствие слева, соблюдая МППСС-72 и учитывая радиусы, описывающие БЭС и препятствие.

Моделирование ситуации, при которой БЭС совершает обгон препятствия, показано на рис. 5. Здесь БЭС совершает обгон, оставляя препятствие справа.

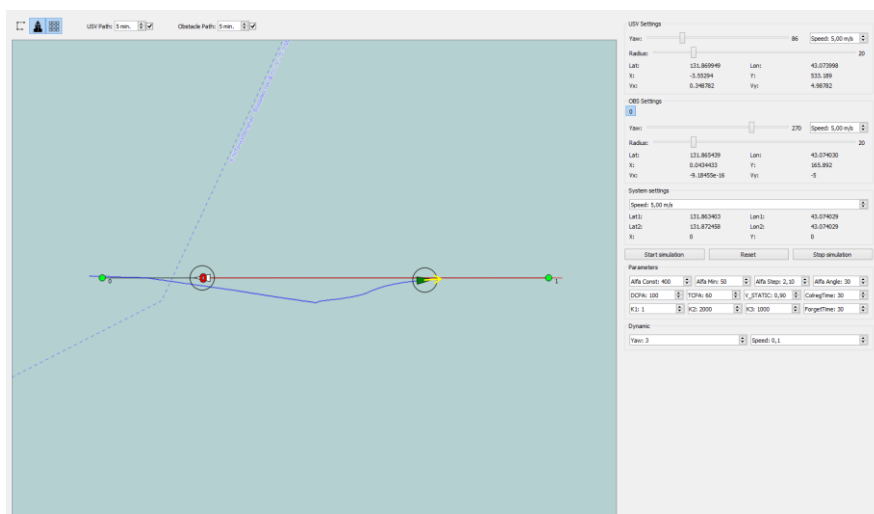


Рис. 4. Движение и расхождение БЭС с препятствием на встречных курсах (траектория движения БЭС – синяя, траектория движения препятствия – красная, путевые точки заданного маршрута БЭС – зеленые, длина заданного маршрута = 550 м)

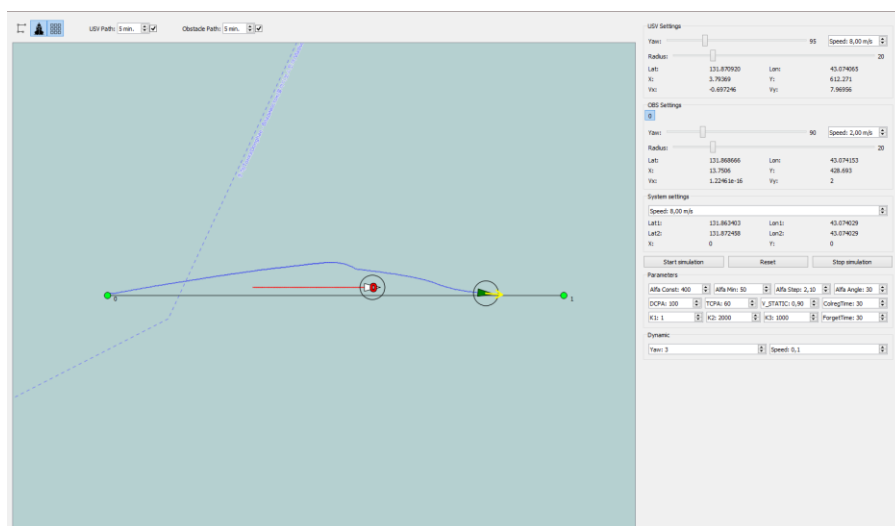


Рис. 5. Движение и расхождение БЭС с препятствием при обгоне (траектория движения БЭС – синяя, траектория движения препятствия – красная, путевые точки заданного маршрута БЭС – зеленые, длина заданного маршрута = 550 м)

Расхождение БЭС в ситуации пересечения курсов, когда препятствие находится справа, показано на рис. 6. При движении препятствия справа БЭС сбавляет скорость и меняет курс, уступая дорогу и обходя препятствие через корму, соблюдая МППСС-72 и учитывая радиусы, описывающие БЭС и препятствие.

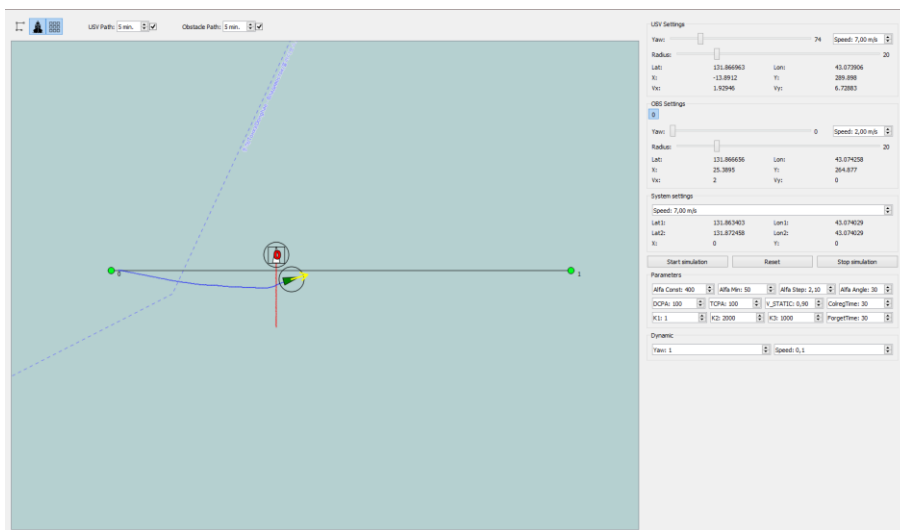


Рис. 6. Движение и расхождение БЭС с препятствием при пересечении курсов, препятствие справа (траектория движения БЭС – синяя, траектория движения препятствия – красная, путевые точки заданного маршрута БЭС – зеленые, длина заданного маршрута = 550 м)

На рис. 7 показано моделирование ситуации пересечения курсов, когда препятствие находится слева от БЭС. В данном случае согласно правилам уступить дорогу должно препятствие, что не реализовано в его программе движения. Безэкипажное судно пытается пройти, не уступая препятствию, но при этом незначительно меняет курс для уклонения от столкновения.

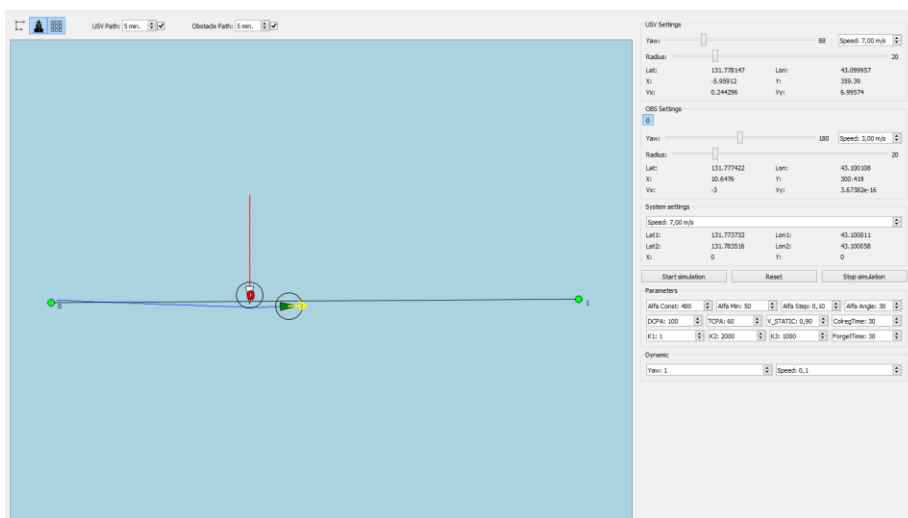


Рис. 7. Движение и расхождение БЭС с препятствием при пересечении курсов, препятствие слева (траектория движения БЭС – синяя, траектория движения препятствия – красная, путевые точки заданного маршрута БЭС – зеленые, длина заданного маршрута = 550 м)

Заключение

Разработанный программный симулятор движения и расхождения БЭС позволяет оценить корректность работы алгоритмов движения с учетом правил МППСС-72. Функционал симулятора дает возможность смоделировать различные сценарии движения, включая заданный маршрут движения и требуемую скорость БЭС, курс и скорость движения препятствия, начальные позиции участников движения и их размеры. Возможно введение пользователем произвольных коэффициентов для расчета используемых алгоритмов движения и расхождения.

Отображение траектории движения БЭС и препятствия, а также графическая визуализация стоимостной функции сетки вариантов курсов и скоростей позволяют проанализировать работу применяемых алгоритмов.

Описание подсистем движения и расхождения в виде отдельных программных элементов на языке C++ после их окончательного тестирования и отладки позволяет применить их в бортовых системах управления безэкипажных судов практически без изменений.

В дальнейшем планируется усовершенствование разработанного программного симулятора путем введения возможностей формирования более разнообразных сценариев движения и расхождения с использованием группы подвижных препятствий со сложными траекториями. Возможно моделирование воздействий условий внешней среды – ветра и течений, проведение исследований быстродействия используемых алгоритмов и изучение возможности их оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Liu Z. et al.* Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // *Annual Reviews in Control*. 2016. V. 41. Pp. 71–93.
2. *Gu Y., Wallace S.W.* Operational benefits of autonomous vessels in logistics – A case of autonomous water-taxi in Bergen // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. V. 154. P. 102456.
3. *Kretschmann L., Burmeister H.C., Jahn C.* Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier // *Research in transportation business & management*. 2017. V. 25. Pp. 76–86.
4. *Paravisi M. et al.* Unmanned surface vehicle simulator with realistic environmental disturbances // *Sensors*. 2019. V. 19. № 5. P. 1068.
5. *Lee H.W. et al.* Integrated Simulation of Virtual Prototypes and Control Algorithms of Unmanned Surface Vehicles Based on a Robot Operating System // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. V. 29. № 4. P. 2.
6. *Ma Y. et al.* Collision-avoidance under COLREGS for unmanned surface vehicles via deep reinforcement learning // *Maritime Policy & Management*. 2020. V. 47. № 5. Pp. 665–686.
7. *Deng F. et al.* COLREGs: Compliant Dynamic Obstacle Avoidance of USVs Based on the Dynamic Navigation Ship Domain // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. № 8. P. 837.
8. *Пушкарёв И.И.* Система управления движением и расхождением безэкипажного судна в соответствии с МППСС-72 // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2022. Т. 14. № 6. С. 837–848.
9. *Дыда А.А., Чумакова К.Н., Пушкарёв И.И.* Подход к управлению судном по траектории на основе градиента вспомогательной функции // *Научные проблемы водного транспорта*. 2020. № 65. С. 27–36.
10. *Fiorini P., Shiller Z.* Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles // *International Journal of Robotics Research*. 1998. Vol. 17. Is. 7. Pp. 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.

11. Бужбецкий Р.Ю. Зависимость дистанции кратчайшего сближения от курса маневрирующего судна // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 3. С. 69–72.
12. Joseph L., Johny A. Fundamentals of C for Robotics Programming // Robot Operating System (ROS) for Absolute Beginners: Robotics Programming Made Easy. Berkeley, CA: Apress, 2022. Pp. 53–91.
13. Егоров Д.В., Бобков В.Д. Анализ языков программирования роботов // OPEN INNOVATION. 2018. С. 45–47.
14. Moler C., Little J. A history of MATLAB // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2020. Т. 4. №. HOPL. P. 1–67.
15. Python W. Python // Python Releases Wind. 2021. Vol. 24.
16. Josuttis N. M. The C++ standard library: a tutorial and reference. 2012.
17. Lazar G., Penea R. Mastering Qt 5: Create stunning cross-platform applications using C++ with Qt Widgets and QML with Qt Quick. Packt Publishing Ltd, 2018.
18. Шарлай Г.Н. МППСС-72 с комментариями: учеб. пособие. М.: Моркнига, 2017. 136 с.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2023 г.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE SIMULATOR FOR THE MOTION AND COLREG OBSTACLE AVOIDANCE OF UNMANNED SHIP

A.A. Duda, I.I. Pushkarev, A.F. Krasavina *

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
50a, Verhneportovaya st., Vladivostok, 690003, Russian Federation

E-mail: adyda@mail.ru, b_r_i_g88@mail.ru, ankras2004@mail.ru

Abstract. *The article discusses the development of a software simulator for the motion and COLREG obstacle avoidance of unmanned ship, the use of which simplifies the process of creating and testing unmanned vessels. The main requirements for the simulator, its purpose, structure, and capabilities are presented. The algorithmic basis of the developed simulator is described: the trajectory tracking subsystem uses the gradient algorithm of the auxiliary function, and the obstacle avoidance subsystem is implemented using the velocity obstacle method adapted for the COLREG. The general logic diagram of the program is presented, containing basic subsystems, elements that provide flexibility in configuring the simulator, and elements for analyzing the results of its work. The most common programming languages in the field of robotics are considered, and the suitable language for developing the software simulator – the C++ programming language – is chosen. The graphical interface of the developed program and its main elements are presented. To test the functionality of the software simulator, modeling of the main obstacle avoidance situations was carried out: head-on, crossing (obstacle moves to the left or right), and overtaking. The results of this modeling are presented. The created software simulator for the motion and obstacle avoidance of unmanned ship meets the requirements set for it in the work, allows modeling of the motion of unmanned ship and to perform avoidance according to COLREG. The implementation of trajectory tracking and obstacle avoidance subsystems as separate software elements makes it possible to use them without significant modifications in the onboard control systems of unmanned ships.*

Keywords: *unmanned ship, obstacle avoidance, COLREG, software simulator, modeling, programming language, control system.*

REFERENCES

1. Liu Z. et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control. 2016. V. 41. Pp. 71–93.
2. Gu Y., Wallace S.W. Operational benefits of autonomous vessels in logistics – A case of autonomous water-taxi in Bergen // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2021. V. 154. P. 102456.
3. Kretschmann L., Burmeister H.C., Jahn C. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier // Research in transportation business & management. 2017. V. 25. Pp. 76–86.
4. Paravisi M. et al. Unmanned surface vehicle simulator with realistic environmental disturbances // Sensors. 2019. V. 19. № 5. P. 1068.



© The Author(s), 2023

* Alexander A. Duda (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Igor I. Pushkarev, Postgraduate Student.

Anna F. Krasavina, Postgraduate Student.

5. *Lee H.W. et al.* Integrated Simulation of Virtual Prototypes and Control Algorithms of Unmanned Surface Vehicles Based on a Robot Operating System // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. V. 29. № 4. P. 2.
6. *Ma Y. et al.* Collision-avoidance under COLREGS for unmanned surface vehicles via deep reinforcement learning // *Maritime Policy & Management*. 2020. V. 47. № 5. Pp. 665–686.
7. *Deng F. et al.* COLREGs: Compliant Dynamic Obstacle Avoidance of USVs Based on the Dynamic Navigation Ship Domain // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. № 8. P. 837.
8. *Pushkaryov I.I.* Cistema upravleniya dvizheniem i raskhozhdeniem bezekipazhnogo sudna v sootvetstvii s MPPSS-72 [A control system for movement and divergence of unmanned ship according to colreg] // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rech-nogo flota imeni admirala SO Makarova*. 2022. V. 14. № 6. Pp. 837–848. (In Russian)
9. *Dyda A.A., Chumakova K.N., Pushkarev I.I.* Podhod k upravleniyu sudnom po trackto-rii na osnove gradienta vspomogatel'noj funkicii [Auxiliary function gradient approach to marine vehicle path-following control] // *Nauchnye problemy vodnogo transporta*. 2020. № 65. Pp. 27–36. (In Russian)
10. *Fiorini P., Shiller Z.* Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles // *International Journal of Robotics Research*. 1998. Vol. 17. Is. 7. Pp. 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.
11. *Buzhbeckij R.Yu.* Zavisimost' distancii krachajshhego sblizheniya ot kursa manevri-ruyushchego sudna [Dependence of the closest approach distance on the course of the maneu-ving vessel] // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2017. № 3. Pp. 69–72. (In Russian)
12. *Joseph L., Johnny A.* Fundamentals of C for Robotics Programming // *Robot Operating System (ROS) for Absolute Beginners: Robotics Programming Made Easy*. Berkeley, CA: Apress, 2022. Pp. 53–91.
13. *Egorov D.V., Bobkov V.D.* Analiz yazykov programmirovaniya robotov [Analysis of robot programming languages] // *OPEN INNOVATION*. 2018. Pp. 45–47.
14. *Moler C., Little J.* A history of MATLAB // *Proceedings of the ACM on Programming Lan- guages*. 2020. T. 4. № HOPL. Pp. 1–67.
15. *Python W.* Python // *Python Releases Wind*. 2021. Vol. 24.
16. *Josuttis N. M.* The C++ standard library: a tutorial and reference. 2012.
17. *Lazar G., Penea R.* Mastering Qt 5: Create stunning cross-platform applications using C++ with Qt Widgets and QML with Qt Quick. Packt Publishing Ltd, 2018.
18. *SHarlaj G.N.* MPPSS-72 s kommentariyami: uchebnoe posobie [COLREGs-72 with com- ments: textbook]. M.: Morkniga, 2017. 136 pp.

Original article submitted 27.03.2023

УДК 621.391: 621 39

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАФИКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**Б.Я. Лихтциндер¹, А.Ю. Привалов²**

¹ Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
Россия, 443100, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

² Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: lixt@psuti.ru, privalov.ayu@ssau.ru

Аннотация. Рассматривается прохождение потокового видеотрафика через магистральный коммутатор узла связи. Анализируются особенности видеотрафика, который имеет явно выраженный пачечный характер. Исследуются влияние характеристик таких потоков на размеры очередей в узлах телекоммуникационных сетей. Приводятся результаты аналитического рассмотрения и имитационного моделирования. Рассматривается обобщенная формула Хинчина – Поллачека, для групповых потоков показана линейная зависимость числителя указанной формулы от коэффициента загрузки. Показано, что в отличие от пуассоновских потоков размеры очередей в многоканальных системах массового обслуживания с потоками видеотрафика с увеличением числа каналов практически не уменьшаются.

Ключевые слова: видеотрафик, задержки, очереди, групповые потоки, моделирование, системы массового обслуживания, многоканальность.

Введение

Сегодня технология потокового вещания видео все более замещает общепринятую видеотрансляцию, основанную на протоколах RTP/UDP [1–5].

Технология передачи с использованием протокола TCP обладает высокой надежностью, поскольку благодаря наличию обратной связи восстанавливает поврежденные или утерянные во время передачи пакеты.

При управлении TCP видеопотоком в отличие от передачи трафика данных возникают дополнительные трудности, связанные с тем, что потребление видеопакетов происходит с определенной постоянной скоростью, называемой «битрейтом». Битрейт определяет разрешающую способность передаваемого ви-



© Автор(ы), 2023

¹ Борис Яковлевич Лихтциндер, доктор технических наук, профессор кафедры «Мультисервисные сети и информационная безопасность».

² Александр Юрьевич Привалов, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Прикладные математика и физика».

деосообщения. Если пропускная способность канала окажется меньше битрейта, то передача с данным уровнем качества становится невозможной и значение битрейта необходимо уменьшить. Для этого существующие видеокодеки имеют ряд настроек, обеспечивающих ступенчатое изменение битрейта и, следовательно, качества воспроизведения.

Принято считать, что для обеспечения нормальной работы канала, имеющего пропускную способность C и время кругового оборота T , требуется минимальный объем буферной памяти, равный CT [6]. Из этого следует, например, что для одного канала с пропускной способностью 10 гигабит в секунду, работающего в сети с круговой задержкой 250 миллисекунд, потребуется объем буферной памяти, равный 2,5 гигабайт. Принято также считать, что этот объем увеличивается пропорционально числу каналов. Современные магистральные маршрутизаторы обычно являются многоканальными, и необходимый объем памяти существенно возрастает, при этом предъявляются очень высокие требования к ее быстродействию. При современных технологиях повышение быстродействия памяти сопряжено с увеличением удельной мощности и выделяемой энергии и, следовательно, с увеличением габаритных размеров элементов. Таким образом, снижение объема буферной памяти коммутаторов и маршрутизаторов является одним из важных требований при их проектировании и производстве.

Влияние многоканальности

Многоканальный коммутатор и маршрутизатор с общей памятью могут рассматриваться как многоканальные системы массового обслуживания (СМО) с общей очередью. Известно, что для пуассоновских потоков при эквивалентной загрузке каждого из каналов многоканальной СМО с общей очередью средняя очередь, приходящаяся на один канал такой системы, будет существенно меньше очереди в обычной одноканальной системе.

Особенности обработки трафика многоканальными СМО были рассмотрены в [5, 7, 8].

На рис. 1 представлены результаты имитационного моделирования многоканальных СМО с пуассоновскими потоками входных заявок. Показаны зависимости средних размеров очередей $m_q(\rho) = \overline{q(\rho)}$ одного канала от коэффициента загрузки ρ (скрины получены с помощью разработанной нами системы АМС). Из графиков следует, что при увеличении числа каналов размеры средних очередей существенно уменьшаются. Это явление позволило авторам статьи [6] сделать вывод о возможности существенного сокращения объемов буферной памяти в многоканальных магистральных коммутаторах, предполагая, что входные потоки пакетов являются пуассоновскими.

Однако это далеко не всегда так. Трафик пакетов мультисервисных сетей весьма неравномерен, носит пачечный характер, и увеличение числа каналов СМО часто не приводит к существенному уменьшению среднего размера очередей. На рис. 2 представлены результаты имитационного моделирования многоканальных СМО с входными потоками пакетов видеотрафика (указанные результаты, так же как и результаты, приведенные на рис. 1, были получены с использованием системы АМС). Из графиков следует, что при одинаковой загрузке, приходящейся на каждый канал, увеличение числа каналов не приводит к уменьшению размеров очередей, как это происходит с пуассоновскими пото-

ками (почти все каналы либо одновременно заняты, либо одновременно свободны).

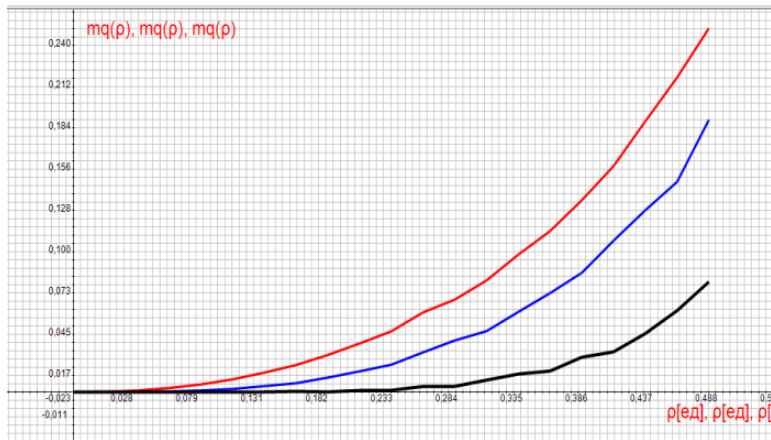


Рис. 1. Зависимости $\overline{q(p)}$ пуассоновского потока для систем с различным числом K каналов: $K = 1$ – верхняя кривая, $K = 2$ – средняя кривая, $K = 10$ – нижняя кривая

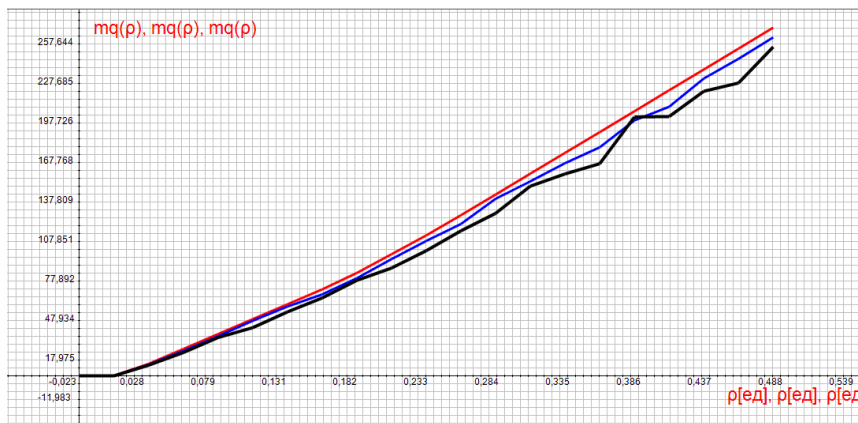


Рис. 2. Зависимости $\overline{q(p)}$ потока видеотрафика для систем с различным числом K каналов: $K = 1$ – верхняя кривая, $K = 50$ – средняя кривая, $K = 100$ – нижняя кривая

В связи с этим возникает актуальная задача введения более адекватных моделей видеотрафика и их анализа. В следующем разделе представлен метод анализа многоканальных СМО, использующийся далее в данной работе.

Интервальный анализ очередей многоканальных СМО

Рассмотрим СМО, имеющую K однотипных каналов обслуживания. Сообщения поступают к любому свободному каналу в соответствии с дисциплиной обслуживания FIFO и образуют единую очередь. Для упрощения будем считать, что времена обслуживания одинаковы и равны τ . Для такой СМО справедливо рекуррентное соотношение, устанавливающее связь между поступающими и обработанными заявками [9]:

$$q_i(\tau) = q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K_i(\tau), \quad (1)$$

$$K_i(\tau) = \begin{cases} K, & \text{если } q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K \geq 0; \\ q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь $K_i(\tau)$ – число каналов обслуживания, задействованных на i -м промежутке времени τ . Случайная величина $K_i(\tau)$ может принимать $K+1$ различных целых значений (включая нулевое). Если считать $\overline{m_i(\tau)} = \lambda\tau$, то загрузка одного канала определится соотношением

$$\rho = \frac{\overline{m_i(\tau)}}{K} = \frac{\lambda\tau}{K}.$$

Математическое ожидание

$$\overline{K_i(\tau)} = \overline{m_i(\tau)} = K\rho.$$

Из выражения (1) следует, что

$$q_i(\tau) = q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K, \text{ если } q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) > K;$$

$$q_i(\tau) = 0, \text{ если } q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) \leq K.$$

Возведем первое равенство (1) в квадрат:

$$\begin{aligned} q_i^2(\tau) &= q_{i-1}^2(\tau) + 2q_{i-1}(\tau)[m_i(\tau) - K_i(\tau)] + [m_i(\tau) - K_i(\tau)]^2 = \\ &= q_{i-1}^2(\tau) + 2q_{i-1}(\tau)m_i(\tau) - 2q_{i-1}(\tau)K_i(\tau) + m_i^2(\tau) - 2m_i(\tau)K_i(\tau) + K_i^2(\tau) = \quad (2) \\ &= q_{i-1}^2(\tau) + 2q_{i-1}(\tau)m_i(\tau) - 2K_i(\tau)[q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K_i(\tau)] + m_i^2(\tau) - K_i^2(\tau). \end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что при рассмотренных выше ограничениях $K_i(\tau) \leq K$ выполняется равенство

$$K_i(\tau)[q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K_i(\tau)] = K(\tau)[q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K_i(\tau)].$$

Действительно, если $K_i(\tau) = K$, то равенство выполняется автоматически.

Если $K_i(\tau) \leq K$, то выражения в квадратных скобках равны нулю и равенство также выполняется. Подставляя в (2), получим:

$$\begin{aligned} q_i^2(\tau) &= q_{i-1}^2(\tau) + 2q_{i-1}(\tau)m_i(\tau) - 2K[q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - K_i(\tau)] + m_i^2(\tau) - K_i^2(\tau) = \\ &= q_{i-1}^2(\tau) + 2q_{i-1}(\tau)m_i(\tau) - 2Kq_{i-1}(\tau) + 2Km_i(\tau) - 2KK_i(\tau) + m_i^2(\tau) - K_i^2(\tau). \end{aligned}$$

Производя усреднение, получим:

$$\begin{aligned} 0 &= 2\overline{q_{i-1}(\tau)m_i(\tau)} - 2K\overline{q_{i-1}(\tau)} + 2K\overline{m_i(\tau)} - 2K\overline{K_i(\tau)} + \overline{m_i^2(\tau)} - \overline{K_i^2(\tau)}, \\ 2\overline{q(\tau)}[K - \overline{m_i(\tau)}] &= 2K[\overline{m_i(\tau)} - \overline{K_i(\tau)}] + \overline{m_i^2(\tau)} - \overline{K_i^2(\tau)} + 2\text{Cov}[q_{i-1}(\tau); m_i(\tau)]. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\overline{K_i(\tau)} = \overline{m_i(\tau)}$, получим:

$$\overline{q(\tau)} = \frac{\overline{m_i^2(\tau)} - \overline{K_i^2(\tau)} + 2\text{Cov}[q_{i-1}(\tau); m_i(\tau)]}{2[K - \overline{m_i(\tau)}]}.$$

Обозначим $D_m(\tau) = \overline{m_i^2(\tau)} - \overline{m_i(\tau)}^2$, $D_K(\tau) = \overline{K_i^2(\tau)} - \overline{K_i(\tau)}^2$, получим:

$$\overline{q(\tau)} = \frac{D_m(\tau) - D_K(\tau) + 2\text{Cov}[q_{i-1}(\tau); m_i(\tau)]}{2[K - \overline{m_i(\tau)}]}. \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$D_{1m}(\rho) = \frac{D_m(\tau)}{K^2}; \quad D_{1k}(\rho) = \frac{D_k(\tau)}{K^2}; \quad m_{1i}(\rho) = \frac{m_i(\tau)}{K},$$

тогда

$$\overline{q_{1K}(\rho)} = \frac{D_{1m}(\rho) + 2\text{Cov}[q_{1K;i-1}(\rho); m_{1i}(\rho)] - D_{1K}(\rho)}{2(1-\rho)}. \quad (4)$$

Здесь $q_{1K;i-1}(\rho) = \frac{q_{i-1}(\rho)}{K}$, а $\overline{q_{1K}(\rho)} = \frac{\overline{q(\rho)}}{K}$ – среднее значение очереди, приходящееся на один канал многоканальной СМО, каждый из каналов которой загружен с коэффициентом загрузки ρ . Обозначим:

$$J(\rho) = 1 + \frac{2\text{Cov}[q_{1K;i-1}(\rho); m_{1i}(\rho)]}{D_{1m}(\rho)}.$$

Этот коэффициент называют «индекс дисперсии». Произведение $D_{1m}(\rho)J(\rho) = D_{1E}(\rho)$ назовем эквивалентной дисперсией входного потока заявок. Получим:

$$\overline{q_{1K}(\rho)} = \frac{D_{1E}(\rho) - D_{1K}(\rho)}{2(1-\rho)}.$$

Эквивалентная дисперсия входного потока заявок не учитывает многоканальность СМО, а отражает лишь динамические свойства входного потока.

Наличие многоканальности учитывается дисперсией числа занятых каналов $D_{1K}(\rho)$.

Интервальный анализ для пуассоновских входных потоков

Для демонстрации применения метода рассмотрим частный случай одноканальной СМО с пуассоновским входным потоком, канал которой загружен с коэффициентом ρ . Для такой системы

$$K=1, \quad D_{1m}(\rho) = \rho, \quad \text{Cov}[q_{1K;i-1}(\rho); m_{1i}(\rho)] = 0, \quad D_{1Kp}(\rho) = D_{1p}(\rho),$$

$$\overline{q_{1p}(\rho)} = \frac{\rho - D_{1p}(\rho)}{2(1-\rho)}. \quad (5)$$

Здесь $\overline{q_{1p}(\rho)}$ – среднее значение очереди, приходящееся на один канал многоканальной СМО с пуассоновским потоком, каждый из каналов которой загружен с коэффициентом загрузки ρ ; $D_{1p}(\rho)$ представляет собой дисперсию числа занятых каналов, включая нулевое значение, при пуассоновском входном потоке.

Поскольку канал всего один, поток чисел занятых каналов $K_i = 0; 1$ представляет собой поток единичных и нулевых значений с вероятностями занятости канала, равными ρ , и незанятости канала $(1-\rho)$. Дисперсия такой случайной

величины $D_{1p}(\rho) = \rho(1-\rho)$. Подставляя указанные значения в (5), получим формулу Хинчина – Поллачека для одноканальной системы в ее обычном виде:

$$\overline{q_{1p}(\rho)} = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}. \quad (6)$$

Анализ выражения $(1-\rho)$ для одноканальной системы показывает, что оно представляет собой вероятность того, что «не все» каналы заняты. Обозначим такую вероятность для многоканальной системы с пуассоновским входным потоком через $1-B_{kp}(\rho)$. Тогда вероятность того, что все K каналов заняты и вновь пришедшая заявка поступит в очередь, будет равна $B_{kp}(\rho)$. Принимая во внимание указанные рассуждения, после подстановки в (5) для многоканальной СМО с пуассоновским входным потоком получим:

$$\overline{q_{kp}(\rho)} = \frac{B_{kp}(\rho)\rho}{2(1-\rho)}. \quad (7)$$

Подобное выражение было приведено в книге [10] для СМО $M/M/n$ ($n=K$) и свидетельствует о справедливости сделанных допущений. Там же приводится формула для определения $B_{kp}(\rho)$ в зависимости от числа каналов K для такой СМО:

$$B_{kp}(\rho) = \left[1 - \frac{\sum_{i=0}^{K-1} \frac{(K\rho)^i}{i!}}{\sum_{i=0}^K \frac{(K\rho)^i}{i!}} \right] \cdot \left[1 - \rho \frac{\sum_{i=0}^{K-1} \frac{(K\rho)^i}{i!}}{\sum_{i=0}^K \frac{(K\rho)^i}{i!}} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Графическое представление этой зависимости показано на рис. 3.

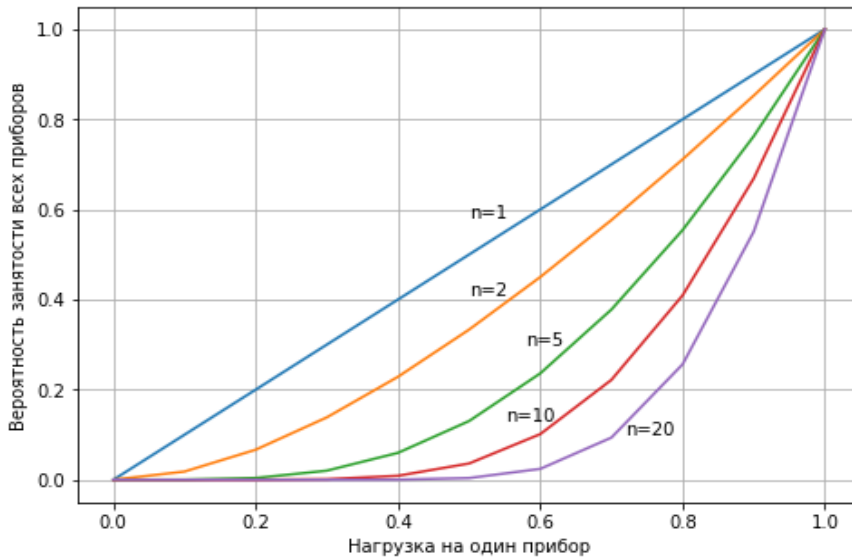


Рис. 3. Зависимость вероятности $B_{lm}(\rho)$ для различных чисел каналов

Для $M/D/K$, которую мы рассмотрели с помощью интервального анализа, аналитической формулы нет, и мы посчитаем $B_{Kp}(\rho)$ численно, используя численный метод, описанный в [11], для сравнения со значениями, получающимися по формуле (8).

Метод из [11] заключается в составлении бесконечной системы уравнений баланса для вложенной марковской цепи, описывающей количество занятых приборов в системе, и решении ее методом производящих функций. Показано, что состояние системы $M/D/n$, рассматриваемое в моменты ухода заявок из системы, образует однородную марковскую цепь со счетным числом состояний, и переходная матрица (полубесконечная) этой вложенной марковской цепи имеет вид

$$P = (p_{i,j})_{i,j=0,1,\dots} = \begin{pmatrix} \pi_0 & \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \cdots \\ \pi_0 & \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \pi_0 & \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \cdots \\ 0 & \pi_0 & \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \cdots \\ 0 & 0 & \pi_0 & \pi_1 & \pi_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

где $\pi_i = \frac{(\lambda\tau)^i}{i!} \exp(-\lambda\tau)$, а количество одинаковых строк в начале матрицы равно

K – числу обслуживающих приборов в системе. Если нагрузка системы меньше 1, то будет существовать стационарное распределение этой марковской цепи, система уравнений баланса которой, записанная для стационарных вероятностей (обозначим их p_i), выглядит так:

$$p_i = \pi_i \sum_{k=0}^{K-1} p_k + \sum_{k=0}^i \pi_k p_{K+i-k}, \quad i \geq 0.$$

Зная p_i для $i=0, \dots, K-1$, из данной системы рекуррентно можно вычислить остальные p_i для $i \geq K$, а именно

$$\frac{1}{\pi_0} p_{K+i} = \left(p_i - \pi_i \sum_{k=0}^{K-1} p_k - \sum_{k=1}^i \pi_k p_{K+i-k} \right), \quad i \geq 0.$$

Для определения p_i для $i=0, \dots, K-1$ ищется решение системы уравнений баланса в терминах производящих функций

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i z^i.$$

Умножая i -тое уравнение системы уравнений баланса на z^i , суммируя по i и используя свойства пуассоновских вероятностей, можно получить, что

$$P(z) = \exp(-\lambda\tau(1-z)) \left(\sum_{k=0}^{K-1} p_k + \frac{1}{z^K} \left(P(z) - \sum_{k=0}^{K-1} p_k z^k \right) \right),$$

откуда

$$P(z) = \frac{z^K \sum_{k=0}^{K-1} p_k - \sum_{k=0}^{K-1} p_k z^K}{z^K \exp(-\lambda \tau (1-z)) - 1}.$$

Далее в [11] с использованием теоремы Руше и аналитичности функции $P(z)$ в единичном круге, включая его границу, показывается, что каждому корню знаменателя в выражении для $P(z)$ должен соответствовать корень числителя этого выражения, то есть для каждого из K корней z_i , $i=0, \dots, K-1$ уравнения

$$z_i^K \exp(-\lambda \tau (1-z_i^K)) - 1 = 0$$

должно выполняться

$$z_i^K \sum_{k=0}^{K-1} p_k - \sum_{k=0}^{K-1} p_k z_i^K = 0, \quad i=1, \dots, K-1.$$

В этот набор уравнений не включено уравнение для $z_0 = 1$, которое тривиально, и вместо него туда надо включить уравнение из условий нормировки вероятностей p_i , которое выглядит так:

$$\frac{1}{K - \lambda} \left(K \sum_{k=0}^{K-1} p_k - \sum_{k=0}^{K-1} k p_k \right) = 0.$$

Численным решением этой системы и находятся вероятности занятости $0, 1, \dots, K-1$ приборов. К сожалению, данная система для больших K и больших ρ становится сильно обусловленной и стандартными библиотеками численных расчетов (использовалась numpy) не решается. Однако близкие значения $B_{Kp}(\rho)$, получающиеся из (8) и численных расчетов при небольших значениях K и ρ (см. таблицу), позволяют использовать формулу (8) для $M/M/K$ как хорошее приближение для $M/D/K$. Причем $B_{Kp}(\rho)$ для $M/M/K$ всегда больше, чем для $M/D/K$, и будут использоваться как верхняя граница для последних.

Вероятности занятости всех приборов в многоканальных СМО

ρ		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$n = 2$	M/M/n	0.0182	0.0667	0.1385	0.2286	0.3333	0.4500	0.5765	0.7111	0.8526
	M/D/n	0.0178	0.0645	0.1336	0.2208	0.3233	0.4387	0.5654	0.7019	0.8471
$n = 3$	M/M/n	$3.7 \cdot 10^{-3}$	0.0247	0.0700	0.1412	0.2368	0.3547	0.4923	0.6472	0.8171
	M/D/n	$3.6 \cdot 10^{-3}$	0.0236	0.0665	0.1338	0.2253	0.3398	—	—	—
$n = 4$	M/M/n	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	0.0370	0.0907	0.1739	0.2870	0.4287	0.5964	0.7878
	M/D/n	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	0.0349	—	—	—	—	—	—

Для одноканальной системы $B_{1m}(\rho) = \rho$ и справедлива формула (6).

Как следует из предыдущего, мы рассматриваем значения средней очереди, приходящиеся на один канал многоканальной системы. Сравним их со значениями очередей в эквивалентной одноканальной системе с аналогичной загрузкой ρ . В одноканальной системе пришедшая заявка поступит в очередь с вероятностью того, что единственный канал занят, равной ρ . В многоканальной системе эта заявка поступит в очередь лишь в случае, если заняты все K каналов. Ука-

занное событие происходит с вероятностью $B_K(\rho)$. Если принять во внимание, что средние значения очередей пропорциональны вероятностям поступающих в них заявок, то должно быть справедливо соотношение

$$\eta_K(\rho) = \frac{\overline{q_{1K}(\rho)}}{\overline{q_1(\rho)}} = \frac{B_{1K}(\rho)}{B_1(\rho)} = \frac{B_{1K}(\rho)}{\rho}. \quad (9)$$

Коэффициент $\eta_K(\rho)$ показывает степень уменьшения размеров средней очереди, приходящейся на один канал многоканальной СМО с общей очередью, по сравнению с аналогичной одноканальной системой. Семейство кривых $\eta_{Kp}(\rho)$ для пуассоновского потока показано на рис. 4.

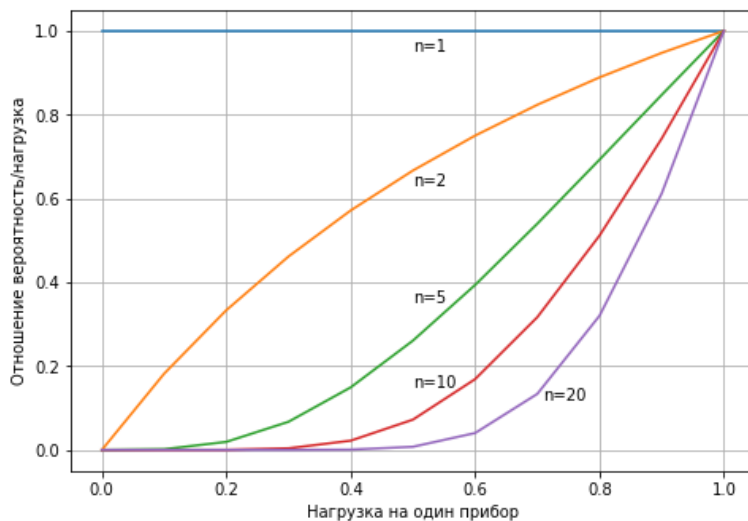


Рис. 4. Семейство кривых $\eta_{Kp}(\rho)$ для пуассоновского потока

Из рис. 4 следует, что даже небольшое число каналов при пуассоновском входном потоке обеспечивает существенное уменьшение средней длины очереди по сравнению с одноканальной системой. С увеличением числа каналов (приборов обслуживания) для пуассоновских потоков наблюдается существенное уменьшение размеров очередей.

К сожалению, для потоков общего вида рассмотренная формула определения вероятности $B(\rho)$ того, что в системе заняты все K каналов, неприменима, и утверждение об уменьшении среднего размера очереди с увеличением числа каналов справедливо далеко не всегда.

Анализ для потока с групповым прибытием

В качестве более адекватной модели видеотрафика рассмотрим поток с групповым прибытием, в котором согласно пуассоновскому потоку прибывают не отдельные заявки, а пачки заявок, для простоты одинакового размера M . Групповой поток является частным случаем пачечного потока [12–15], когда все заявки пачки поступают одновременно. Обработка каждой заявки из пачки тре-

будет одинакового времени одного из имеющихся идентичных K процессоров коммутатора (каналов обслуживания).

Сначала рассмотрим случай, когда $K > M$, причём $K/M = n$ – целое число. Нетрудно видеть, что в такой системе занятие и освобождение каналов происходит только группами по M штук и такая СМО эквивалентна СМО $M/D/n$, рассмотренной выше. Если же K/M не целое и $n_1 < K/M < n_2$, где n_1 и n_2 – целые числа, то при эквивалентной нагрузке на один канал ρ точка, соответствующая средней очереди в системе, будет находиться между соответствующими кривыми на рис. 4 с абсциссой ρ и выигрыш в размере очереди по-прежнему будет иметь место.

Однако случай, когда размер пачки меньше числа каналов в коммутаторе, трудно ожидать на практике.

Если же $M > K$ и для простоты пусть $M/K = k$ – целое, то нетрудно видеть, что в данной системе заявки забираются на обслуживание всегда группами по K штук и данная СМО эквивалентна одноканальной СМО с групповым прибытием, где пачки имеют постоянный размер k . Для такой системы уравнение (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} q_i(\tau) &= q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - \delta_i(\tau), \\ \delta_i(\tau) &= \begin{cases} 0, & \text{если } q_{i-1}(\tau) = m_i(\tau) = 0; \\ 1 & \text{в противном случае.} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Нетрудно увидеть некоторые особенности $\delta_i(\tau)$: $\delta_i^2(\tau) = \delta_i(\tau)$; $\delta_i(\tau)m_i(\tau) = m_i(\tau)$; $\overline{\delta_i(\tau)} = \overline{m_i(\tau)}$, $\delta_i(\tau)q_{i-1}(\tau) = q_{i-1}(\tau)$.

Заметим также, что для этой одноканальной системы в стационарном состоянии

$$\overline{m_i(\tau)} = \rho = \lambda \tau k. \quad (11)$$

Как и ранее, возведем в квадрат обе части (10) и после преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе (3) и (4), получим их аналог в виде

$$\overline{q(\tau)} = \frac{D_m(\tau) + 2\text{Cov}(q_{i-1}(\tau); m_i(\tau)) - D_1(\tau)}{2(1 - \overline{m_i(\tau)})}.$$

Вспомним еще, что в одноканальном случае

$$D_1(\tau) = \overline{m_i(\tau)}(1 - \overline{m_i(\tau)}),$$

и предыдущее выражение можно переписать в виде

$$\overline{q(\tau)} = \frac{D_m(\tau) + 2\text{Cov}(q_{i-1}(\tau); m_i(\tau))}{2(1 - \overline{m_i(\tau)})} - \frac{m_i(\tau)}{2}. \quad (11)$$

Это обобщение формулы Поллачека – Хинчина для любой одноканальной СМО со стационарным входным потоком и постоянным временем обслуживания τ [9, 16], а для рассматриваемого потока с пуассоновским приходом пачек постоянного размера k имеем

$$\text{Cov}(q_{i-1}(\tau); m_i(\tau)) = 0; \quad D_m(\tau) = \lambda \tau k^2 = \rho k,$$

$$\overline{q(\tau)} = \frac{\rho k}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2} = \frac{\rho(k-1) + \rho^2}{2(1-\rho)}.$$

Никакого уменьшения очереди не наблюдается, при увеличении ρ характер роста очередей одинаков, а рост k еще линейно увеличивает среднюю очередь (при постоянном ρ). Так как эта система эквивалента многоканальной с пачечным прибытием, когда размер пачки превышает количество каналов, то можно заключить, что коль скоро $M / K = k > 1$, то независимо от количества каналов K уменьшение очереди в расчете на канал не происходит.

Заключение

В многоканальных СМО с пуассоновскими потоками размеры очередей в пересчете на один канал с эквивалентной загрузкой существенно уменьшаются. Это привело к предложениям сократить объемы буферной памяти коммутаторов мультисервисных сетей связи. Однако видеотрафик в мультисервисных сетях доступа существенно отличается от пуассоновского и носит явно выраженный пачечный характер. Исследование видеотрафика с помощью моделей потоков с групповым прибытием наглядно показало, что для такого трафика указанного уменьшения размеров очередей в многоканальных системах не происходит и уменьшать размеры буферной памяти в коммутаторах сетей доступа по этой причине нельзя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. History of Move Networks. URL: <http://movenetworks.com/history.html>.
2. Xia W. Cross-layer optimization technology for wireless network multimedia video // Computer Optics, Vol. 44(4), (2020), 582–588. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-620.
3. Metzger F., Liotou E., Moldovan C., Hoffeld T. TCP video streaming and mobile networks: Not a love story, but better with context // Comp. Net. J. Vol. 109. Part 2, (2016). Pp. 246–256.
4. Moldovan Ch., Hoffeld T., Hagn K., Sieber Ch. and Kellerer W. Keep Calm and Don't Switch: About the Relationship Between Switches and Quality in HAS // Proc. 29th International Teletraffic Congress, 4-8 Sep. 2017, Genoa, Italy. URL: https://www.researchgate.net/publication/320366462_Keep_Calm_and_Don%27t_Switch_About_the_Relationship_Between_Switches_and_Quality_in_HAS
5. Sahraoui Y., Ghanam A., Zaidi S., Bitam S., Mellouk A. Performance evaluation of TCP and UDP based video streaming in vehicular ad-hoc networks // Proc. of 2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT). 2018. Pp. 67–72. DOI: 10.1109/SaCoNeT.2018.8585447.
6. Appenzeller G., Keslassy I., McKeown N. Sizing Router Buffers // Proceedings of SIGCOMM'04. Portland, Oregon, USA, 2004. Pp. 281–292.
7. Лихтциндер Б.Я. Особенности многоканальной обработки пачечного трафика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 11. С. 30–33.
8. Intelligent Buffer Management on Cisco Nexus 9000 Series Switches. Cisco, 2017. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/nexus-9000-series-switches/white-paper-c11-738488.htm>
9. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 290 с.
10. Martin J. System Analysis For Data Transmisson. Vol. 1, Prentice Hall, New Jersey, 1972.
11. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М.: РУДН, 1995. 529 с.
12. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications. Springer Science + Business Media., 2013. 388 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>.
13. Вишнеvский В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.

14. *Neuts M.F.* Versatile Markovian point process // *Journal of Applied Probability*. 1979. Vol. 16, Issue 4. Pp. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>.
15. *Дудин А.Н., Клименок В.И.* Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000. 175 с.
16. *Лихтциндер Б.Я., Бакай Ю.О.* Модели групповых пуассоновских потоков в управлении телекоммуникационным трафиком // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2020. Т. 28, № 3. С. 75–89.

Статья поступила в редакцию 09 марта 2023 г.

INTERVAL TRAFFIC ANALYSIS OF MULTICHANNEL QUEUING SYSTEMS

B.Ya. Lichtsinder¹, A.Yu. Privalov²

¹ Volga State University Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstogo str., Samara, 443100, Russian Federation

² Samara National Research University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: lixt@psuti.ru, privalov.ayu@ssau.ru

Abstract. *The passage of streaming video traffic through the backbone switch of the communication node is considered. The features of video traffic, which has a pronounced burst character, are analyzed. The influence of the characteristics of such flows on the sizes of queues in the nodes of telecommunication networks is studied. The results of analytical consideration and simulation modeling are presented. The generalized Khinchin-Pollachek formula is considered and for group flows a linear dependence of the numerator of this formula on the load factor is shown. It is shown that, in contrast to Poisson flows, the queue sizes in multichannel queuing systems with video traffic flows practically do not decrease with an increase in the number of channels.*

Keywords: *video traffic, delays, queues, group flows, modeling, queuing systems, multichannel.*

REFERENCES

1. History of Move Networks. URL: <http://movenetworks.com/history.html>.
2. Xia W. Cross-layer optimization technology for wireless network multimedia video // Computer Optics, Vol. 44(4), (2020), 582–588. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-620.
3. Metzger F., Liotou E., Moldovan C., Hoßfeld T. TCP video streaming and mobile networks: Not a love story, but better with context // Comp. Net. J. Vol. 109. Part 2 (2016). Pp. 246–256.
4. Moldovan Ch., Hoßfeld T., Hagn K., Sieber Ch. and Kellerer W. Keep Calm and Don't Switch: About the Relationship Between Switches and Quality in HAS // Proc. 29th International Teletraffic Congress, 4–8 Sep. 2017, Genoa, Italy. URL: https://www.researchgate.net/publication/320366462_Keep_Calm_and_Don%27t_Switch_About_the_Relationship_Between_Switches_and_Quality_in_HAS
5. Sahraoui Y., Ghanam A., Zaidi S., Bitam S., Mellouk A. Performance evaluation of TCP and UDP based video streaming in vehicular ad-hoc networks // Proc. of 2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT). 2018. Pp. 67–72. DOI: 10.1109/SaCoNeT.2018.8585447.
6. Appenzeller G., Keslassy I., McKeown N. Sizing Router Buffers // Proceedings of SIGCOMM'04. Portland, Oregon, USA, 2004. Pp. 281–292.
7. Lihtcinder B.Ya. Osobennosti mnogokanal'noj obrabotki pachechnogo trafika [Peculiarities of multichannel processing of burst traffic] // T-Comm: Telekomunikacii i transport. 2017. V. 11, № 11. Pp. 30–33. (In Russian)
8. Intelligent Buffer Management on Cisco Nexus 9000 Series Switches. Cisco, 2017. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/nexus-9000-series-switches/white-paper-c11-738488.htm>



© The Author(s), 2023

¹ Boris Ya. Lichtsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

² Alexander Yu. Privalov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

9. *Lihtcinder B.Ya.* Trafik mul'tiservisnyh setej dostupa (interval'nyj analiz i proektirovanie) [Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)]. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2018. 290 pp. (In Russian)
10. *Martin J.* System Analysis For Data Transmisson. Vol. 1, Prentice Hall, New Jersey, 1972.
11. *Bocharov P.P., Pechinkin A.V.* Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. M.: RUDN, 1995. 529 c. (In Russian)
12. *Lakatos L., Szeidl L., Telek M.* Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications. Springer Science + Business Media., 2013. 388 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>.
13. *Vishnevskij V.M., Dudin A.N.* Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi vhodnymi potokami i ih primenenie dlya modelirovaniya telekommunikacionnyh setej [Queueing systems with correlated input flows and their application for modeling telecommunication networks] // Avtomatika i telemekhanika. 2017. № 8. P. 3–59. (In Russian)
14. *Neuts M.F.* Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16, Issue 4. Pp. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>.
15. *Dudin A.N., Klimenok V.I.* Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami [Queueing systems with correlated flows]. Minsk: BGU, 2000. 175 pp. (In Russian)
16. *Lihtcinder B.Ya., Bakaj Yu.O.* Modeli gruppovyh puassonovskih potokov v uprav-lenii telekommunikacionnym trafikom [Models of group Poisson flows in teltecommunications traffic control] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2020. V. 28, № 3. Pp. 75–89. (In Russian)

Original article submitted 09.03.2023

УДК 004.942 519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Е.А. Миронов*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: yaegormir2188@gmail.com

Аннотация. В настоящее время в качестве одного из наиболее перспективных энергоносителей рассматривается водород, производство которого возможно из различных видов сырья, включая воду, природный газ, сероводород, уголь и т. д. В статье представлены основные результаты анализа мировых технологических тенденций в области разработки способов генерации водорода в период с 2010 по 2038 гг., целью которого является выявление востребованных и популярных технологических решений водородной энергетики. Анализ проведен на основе базы данных Международного энергетического агентства, опубликованной в октябре 2022 г., в которой содержится наиболее полная информация о ключевых характеристиках 990 водородных проектов, базирующихся в шестидесяти странах мира: производительности, установленной электрической мощности, выбросах углекислого газа, типе выходного продукта, стадии и сроках реализации. Проведенный анализ свидетельствует об устойчивом лидерстве электролизных технологий генерации водорода в контексте поиска наиболее распространенного способа получения водорода. При этом в мировой водородной энергетике явно выражены тенденции усиленного внедрения альтернативных (неэлектролизных) технологий в рамках крупного промышленного производства. На основе существующей эмпирической модели Уллеберга предложена модифицированная универсальная имитационная структурная модель процесса электролизной генерации водорода в установках с электролизерами щелочного типа и с протонообменной мембраной. Модифицированная модель разработана в пакете прикладных программ MATLAB и среде динамического моделирования Simulink с использованием элементов физического моделирования Simscape. Процедура верификации разработанной модели показала хорошую сходимость результатов моделирования с существующими в открытых источниках экспериментальными данными, полученными на установках щелочного электролиза и электролиза с протонообменной мембраной. Для повышения энергоэффективности процесса производства водорода разработана одноконтурная система автоматического регулирования температуры питательной воды, поступающей на электролизную установку с протонообменной мембраной.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, технологии, производство водорода, электролиз, структурная модель, цифровой двойник, MATLAB, Simulink, протонообменная мембрана.



© Автор(ы), 2023

* Егор Александрович Миронов, инженер кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Введение

В настоящее время одним из наиболее актуальных глобальных трендов мирового развития является использование водорода в качестве энергоносителя и материального ресурса в энергетике, промышленном производстве и различных сферах жизнедеятельности человека [1]. Резкое увеличение производственных мощностей для генерации водорода и продуктов на его основе [2] свидетельствует о растущей динамике развития водородной энергетики в передовых странах мира, в связи с чем необходимы разработка и исследование новых моделей, цифровых двойников и киберфизических систем управления процессами производства водорода, что соответствует магистральному направлению развития мировой энергетики в рамках концепции Индустрии 4.0.

Анализ публикаций [3, 4] показал безусловное лидерство технологий электролизной генерации водорода. В период с 2000 по 2030 гг. электролизные проекты показывают интенсивный рост суммарной производительности в 500 раз, при этом традиционные неэлектролизные технологии значительно уступают в темпах роста, поскольку их производительность выросла только в 15 раз. К группе электролизных технологий в основном относятся щелочной электролиз (ЩЭ) и электролиз с протонообменной мембраной (ЭПМ). Проведенный сравнительный анализ проектов генерации водорода в исследованиях [5, 6], основанных на базе водородных проектов Международного энергетического агентства [7], показал, что до 2022 года большинство проектов с небольшой расчетной нормализованной производственной мощностью (3,5 тыс. $\text{нм}^3\text{H}_2/\text{час}$) и низкой установленной мощностью электролиза (2,3 МВт/проект) являлись демонстрационными, что подтверждается существующими обзорами и исследованиями различных авторов. При этом ожидается, что после 2025 года расчетная нормализованная производственная мощность и электролизная установленная мощность водородных проектов значительно возрастут при одновременном существенном снижении общего количества проектов. Это подтверждает стратегически важный переход от стадии исследований технологических решений к их промышленному внедрению (рис. 1).

Анализ географического распределения проектов производства водорода (рис. 2) показал лидерство проектов из Австралии как по суммарной установленной электрической мощности (59500 МВт), так и по суммарной расчетной нормализованной производственной мощности (15284,44 тыс. $\text{нм}^3\text{H}_2/\text{час}$); по числу проектов лидирует Германия (118 проектов).

Полученные при анализе выводы обуславливают выбор электролизных технологий генерации водорода как предмета исследования и сравнения с альтернативными технологическими решениями для развития и совершенствования технологической базы водородной энергетики будущего. Следует отметить, что несмотря на широкое распространение технологии электролиза воды проблеме ее моделирования нельзя считать полностью решенной к настоящему моменту.

В работах [8, 9] представлен подход к моделированию технологии ЩЭ. Однако модель, построенная на основе данного подхода, оказывается неработоспособной в отдельных случаях. Например, если электрический ток электролизера принимает низкие значения, логарифмическая составляющая становится отрицательной, что приводит к ошибочным результатам, поскольку при моделировании поляризационных кривых отсутствует ограничение на токовый сигнал. Кроме того, малые значения электрического тока приводят к генерации напряжения на контактах электролизной ячейки модели. Однако на практике химическая реак-

ция электролиза происходит только после того, как внешнее приложенное напряжение превышает обратимое напряжение, и при напряжении ниже этого предельного значения ток через электролизер протекать не может [10].

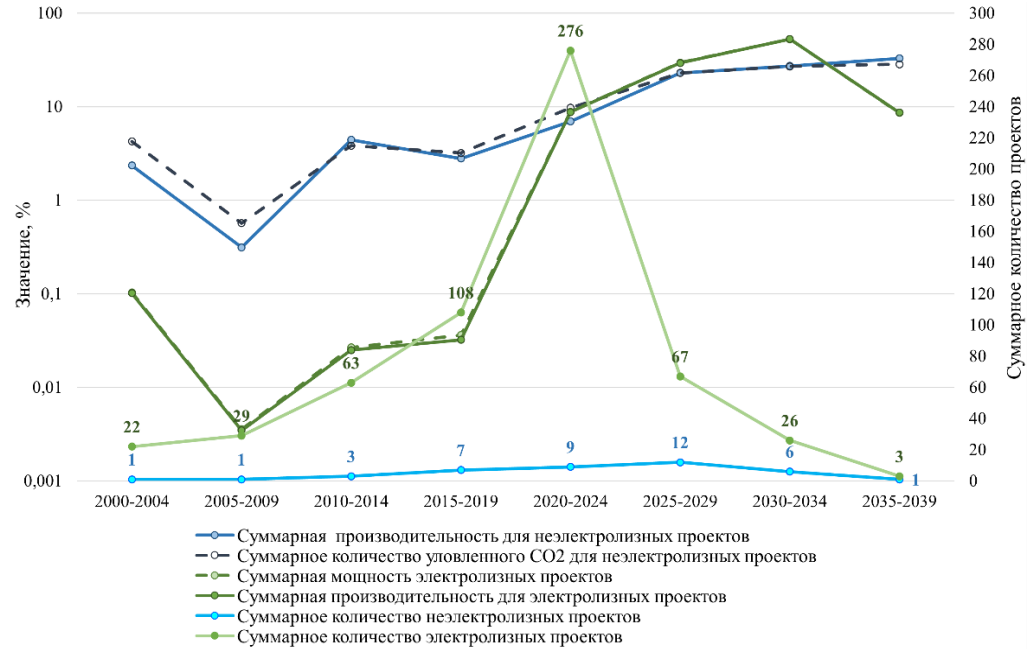


Рис. 1. Динамика изменения суммарной производительности проектов генерации водорода

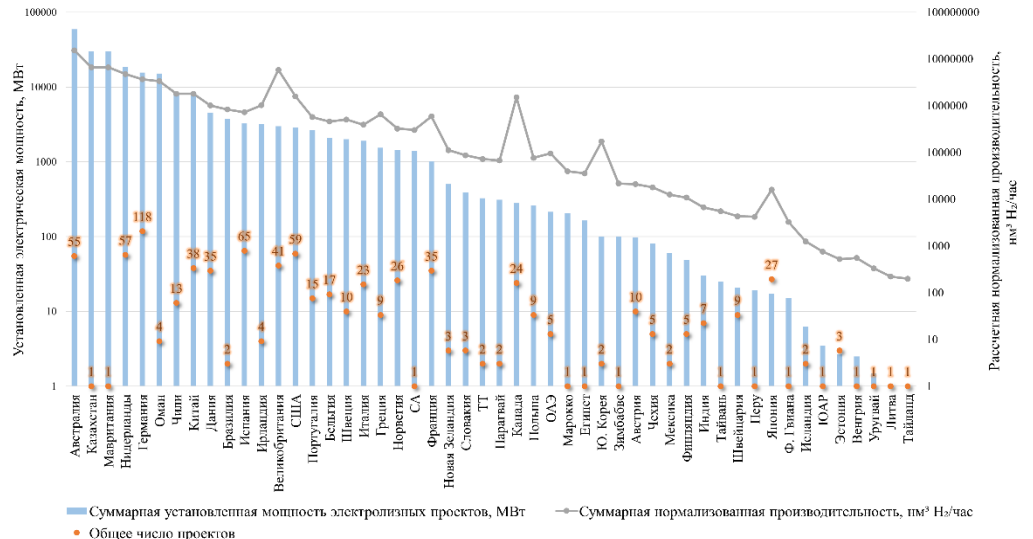


Рис. 2. География распределения проектов производства водорода

В работе предложена модифицированная система эмпирических уравнений, устраняющая недостатки модели, приведенной в [8], которая служит основой для разработки структурной имитационной модели генерации водорода технологией электролиза. Далее описаны результаты верификации и система автоматического

управления температурой электролизной установки, в которой в качестве объекта управления используется модифицированная структурная модель электролизной установки.

Основные технологии электролизной генерации водорода

Использование электроэнергии в технологиях электролиза для производства водородного энергоносителя позволяет широко применять данный процесс в химической, электроэнергетической, транспортной и металлургической отраслях промышленности. Производство водорода электролизным способом предоставляет множество возможностей для аккумулирования и поглощения избыточной энергии, производимой из возобновляемых источников, что частично решает проблему нестабильности производства энергии на основе солнечных, ветровых, атомных источников энергии. Замена ископаемых видов топлива водородным энергоносителем может существенно снизить выбросы парниковых газов при усиленном внедрении электролизных технологий.

Одной из основных электролизных технологий является технология ЭПМ, ориентированная на производство водорода из воды, которая подается на электролизную ячейку, состоящую из трех основных элементов: протонообменной мембраны, анода и катода. Материалом для изготовления катода служит платина или другой катализатор, который реагирует с водой и стимулирует реакцию разложения воды на водород и кислород, а анод, в свою очередь, выполняет функцию отвода электрического тока. Протонообменная мембрана в электролизных установках используется для разделения анодного и катодного пространств. Для изготовления мембраны в основном используют перспективные полимерные материалы, такие как перфторсульфиновая, перфторксетановая кислоты или полиэтилентерефталат, обладающие высокой проводимостью и химической стойкостью [11].

При подаче электрического тока на электролизер происходит процесс расщепления воды на водород и кислород в соответствии с химической реакцией



Электрический ток, проходящий через электроды, обеспечивает передачу электронов водороду, который выделяется на катоде:



Одновременно с водородом на аноде выделяется кислород (3):



В результате реакций (1)–(3) на катоде образуется газообразный водород, который хранится для дальнейшего использования, а кислород в газообразной форме, выделяющийся на аноде, может либо использоваться как побочный продукт процесса, либо отводиться в окружающую среду.

Основными преимуществами технологии ЭПМ являются:

1. Высокая электрическая эффективность, позволяющая производить водород наиболее экономичным способом.
2. Быстродействие: при поступлении энергии на электролизный модуль происходит мгновенная электролитическая реакция, что позволяет производить быстрый старт и останов процесса.
3. Протекание процесса ЭПМ при низком давлении, что гарантирует безопасность работы и понижает риск возникновения взрыва.

4. Адаптивность к масштабированию, позволяющая использовать данную технологию как в промышленных условиях, так и в лабораторных установках.

При наличии большого ряда преимуществ рассматриваемая технология обладает следующими недостатками:

1. Стоимость изготовления ячейки довольно высока: использование катализаторов, изготавливаемых из благородных металлов, делает данную технологию наиболее дорогостоящей по сравнению с другими способами генерации водорода.

2. Технология ЭПМ использует только питательную воду высокой чистоты, поскольку использование неочищенной воды приводит к загрязнению протонообменной мембраны, сокращая срок ее службы.

Основанные на аналогичных (1)–(3) химических реакциях, технологии ЩЭ заключаются в разложении воды на водород и кислород путем прохождения электрического тока через щелочной электролит, в качестве которого используются гидроксиды натрия (NaOH) или калия (KOH) [11].

Основные преимущества ЩЭ:

1. Высокая электрохимическая эффективность, позволяющая получать высокую конверсию энергии в виде газообразного водорода.

2. Низкая стоимость сырья для изготовления электролита.

3. Высокое качество выходных продуктов.

К недостаткам технологии ЩЭ можно отнести:

1. Необходимость использования дорогостоящих и сложных систем подачи электролита для обеспечения требуемой концентрации щелочи.

2. Низкую коррозионную стойкость используемых в процессе элементов аппаратуры и электродов, что приводит к дополнительным затратам на техническое обслуживание.

3. Снижение показателей эффективности процесса ЩЭ при высоких значениях электрического тока, что влечет за собой увеличение затрачиваемой энергии для производства необходимого количества водорода.

Эмпирическая модель электролизной генерации водорода

Подход к моделированию, предложенный в [12], основан на уравнениях, описывающих поведение поляризационных кривых, генерируемых на контактах электролизной ячейки (4):

$$U(t) = N \left[U_{rev} + \frac{I(t)}{A} (r_1 + r_2 \theta) + s \log \left(\left(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2} \right) \frac{I(t)}{A} + 1 \right) \right], \quad (4)$$

где $U(t)$, [В] и $I(t)$, [А] – напряжение и ток, генерируемые на контактах электролизной установки, соответственно; N – число объединенных электролизных ячеек; U_{rev} , [В] – минимально допустимое напряжение, требующееся для активации процесса электролиза (для ЩЭ – $U_{rev}^{ALK} = 1.229$ [В], для ЭПМ – $U_{rev}^{PEM} = 12.3$ [В] [13]); A , [м²] – площадь поверхности электрода; r_1 , [м²]; r_2 , [м² °С⁻¹]; p_1 , [А⁻¹ м²]; p_2 , [А⁻¹ м² °С]; p_3 , [А⁻¹ м² °С²]; s , [В] – шесть коэффициентов, определяемых интерполяцией экспериментальных поляризационных кривых и характеризующих процесс перенапряжения, который, в свою очередь, зависит от температуры поступающего на электролизную установку электролита или воды – θ , [°С].

Для модификации модели (4) предлагается рассмотреть в качестве входных параметров температуру воды или электролита и напряжение, генерируемое на контактах электролизной установки, а в качестве выходных параметров – выработку водорода и электрический ток, протекающий через ячейку электролизера. Кроме того, целесообразно ввести дополнительное ограничение на минимальное напряжение, необходимое для начала реализации процесса электролиза, и расширить эмпирическую модель поляризационных кривых дополнительным уравнением (5) [14], описывающим физико-химический процесс генерации водорода, который зависит от температуры электролита и тока на контактах электролизной ячейки.

Массовая выработка водорода MH_2 , [кг * сек⁻¹], определяется выражением

$$MH_2(t) = \left(\frac{\left(\frac{I(t)}{A} \right)^2}{f_1 + \left(\frac{I(t)}{A} \right)^2} f_2 \right) * \frac{1}{z * F} c v_{std}, \quad (5)$$

где f_1 , f_2 – величины эффективности Фарадея, принимаются постоянными, однако в некоторых случаях могут изменяться в зависимости от температурного режима; z – количество электронов, участвующих в реакции электролиза; F , [Кл * моль⁻¹] – постоянная Фарадея; $c = 0.08988$, [кг * м³] – константа преобразования; $v_{std} = 0.0224136$, [м³ * моль⁻¹] – молярный объем идеального газа.

Предлагается изменить уравнение (4) таким образом, чтобы ток определялся как функция напряжения, а также расширить его дополнительными ограничениями на минимальное напряжение, необходимое для запуска процесса электролиза. Для этого введем следующие обозначения в (4) для упрощения последующих преобразований:

$$a = \frac{1}{s} \left(\frac{U(t)}{N} - U_{rev} \right); b = \frac{1}{sA} (r_1 + r_2 \theta); c = \frac{1}{A} \left(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2} \right). \quad (6)$$

Подставив введенные обозначения (6) в (4), получим:

$$a = bI(t) + \log(cI(t) + 1). \quad (7)$$

При исключении логарифмической составляющей в (7) посредством операции потенцирования и применении различных упрощений, в том числе функции Ламберта (W-функции [15]), становится возможным выразить ток как функцию напряжения следующим образом:

$$I(t) = sA \frac{W \left[\frac{r_1 + r_2 \theta}{s(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2})} \ln 10 * 10^{\frac{r_1 + r_2 \theta}{s(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2})}} * 10^{\frac{1}{s} \left(\frac{U(t)}{N} - U_{rev} \right)} \right]}{(r_1 + r_2 \theta) \ln 10} - \frac{A}{p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2}}. \quad (8)$$

Для более компактной записи уравнения (8) введем следующие обозначения:

$$m = \frac{r_1 + r_2 \theta}{s(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2})} \ln 10; \quad l = 10^{\frac{r_1 + r_2 \theta}{s(p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2})}}. \quad (9)$$

Для действительных значений величины напряжения, соответствующих эмпирическим моделям, применяется основная ветвь W-функции: $W(bI(t) - bc^{-1}) \geq -1$ [15]. Дополнительные ограничения на активацию процесса электролиза с учетом (8), (9) описываются системой:

$$I(t) = \begin{cases} sA \frac{W \left[m * l * 10^{\frac{1}{s} \left(\frac{U(t)}{N} - U_{rev} \right)} \right]}{(r_1 + r_2 \theta) \ln 10} - \frac{A}{p_1 + \frac{p_2}{\theta} + \frac{p_3}{\theta^2}}, & \text{если } U(t) \geq N * U_{rev}; \\ 0, & \text{если } U(t) < N * U_{rev}. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, получаем эмпирическую модель (5), (8) и (10), которая служит основой для разработки имитационной структурной модели в ППП MATLAB/Simulink с использованием элементов из библиотеки физического моделирования Simscape [16].

Структурная имитационная модель электролизной установки

На первом уровне вложенности имитационной структурной модели (рис. 3) реализуется задание входных параметров, к которым относятся температура питательной воды или электролита и напряжение. Напряжение задается с помощью блоков «Control voltage source», которые представляют собой идеальный источник напряжения с мощностью, необходимой для поддержания заданного напряжения на выходе независимо от протекающего тока. Блоки «Current and Voltage measurement» необходимы для измерения тока и напряжения между двумя электрическими узлами, их выходные сигналы могут использоваться на входе других блоков библиотеки Simulink [16].

Второй уровень вложенности имитационной структурной модели (рис. 4) представляет собой подсистему генерации поляризационных кривых. Блок «Switch» необходим для выполнения условий запуска реакции электролиза (10), т. е. если на вход блока поступает напряжение, которое будет меньше величины NU_{rev} , то выход системы будет равен нулю; следовательно, реакция неактивна.

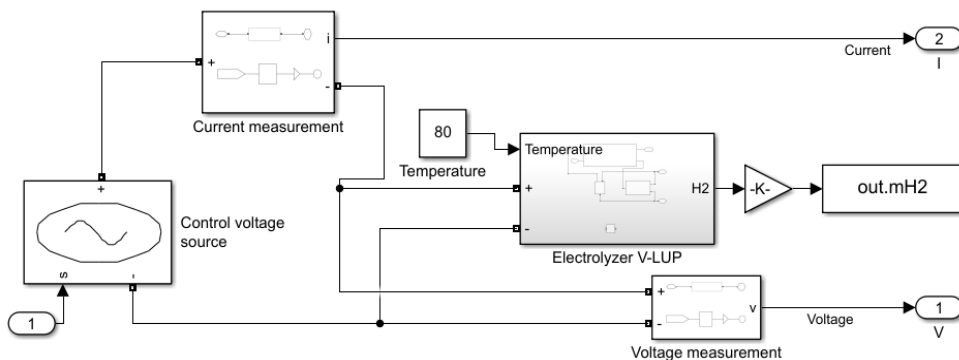
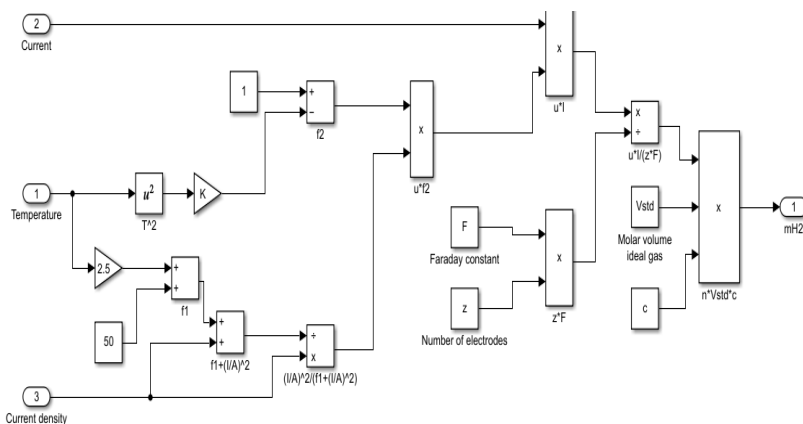


Рис. 3. Верхний уровень вложенности имитационной структурной модели

The schematic diagram illustrates the electrochemical cell model. It features several interconnected blocks and signal lines. On the left, there are input ports for Temperature (labeled 1) and Voltage (labeled 2). The Voltage input is connected to a block containing a switch controlled by a 12.229V threshold. This block also receives a signal from a 1.229V/480 source. The output of this switch-controlled block is connected to a block labeled $n-D T(v)$, which represents the temperature dependence of the rate coefficient. The output of this block is connected to a switch that is also controlled by the 12.229V threshold. The output of this switch is connected to an ammeter (A) and voltmeter (V) block. The output of this block is connected to a block labeled 2, which represents the electrode area. The output of this block is connected to a block labeled $(I/A)^2$, which represents the current density. The output of this block is connected to a block labeled Hydrogen production. The output of this block is connected to a block labeled mH2 (2), which represents the hydrogen production rate. The output of this block is connected to a block labeled Electrical signal (1), which represents the electrical signal output.

Величины температуры, силы и плотности электрического тока являются входными для третьего уровня вложенности модели (рис. 5), на котором происходит расчет количества вырабатываемого водорода согласно выражению (5).



После завершения построения имитационной структурной модели проводится проверка ее адекватности относительно экспериментальной установки.

Процесс верификации результатов имитационного структурного моделирования проводился с использованием экспериментальных данных (рис. 6), полученных для ячеек электролизера щелочного типа с температурами электролита 40, 50, 60, 70, 80 °C и для электролизера с протонообменной мембраной для температур питательной воды 40, 60, 80 °C [8, 13].

В качестве показателя, характеризующего сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных, использовалась нормированная среднеквадратичная оценка [17]. Результаты верификации приведены в табл. 1, где представлены значения указанной оценки в зависимости от типа электролизера и температуры электролита или воды. Поскольку близость полученной оценки к единице свидетельствует о хорошем соответствии структурной модели и экспериментальных данных, разработанная модель может представлять объект управления в САУ процессами электролизной генерации водорода. В частности, была разработана система оптимального управления выработкой водорода в зависимости от заданной температуры электролита или воды.

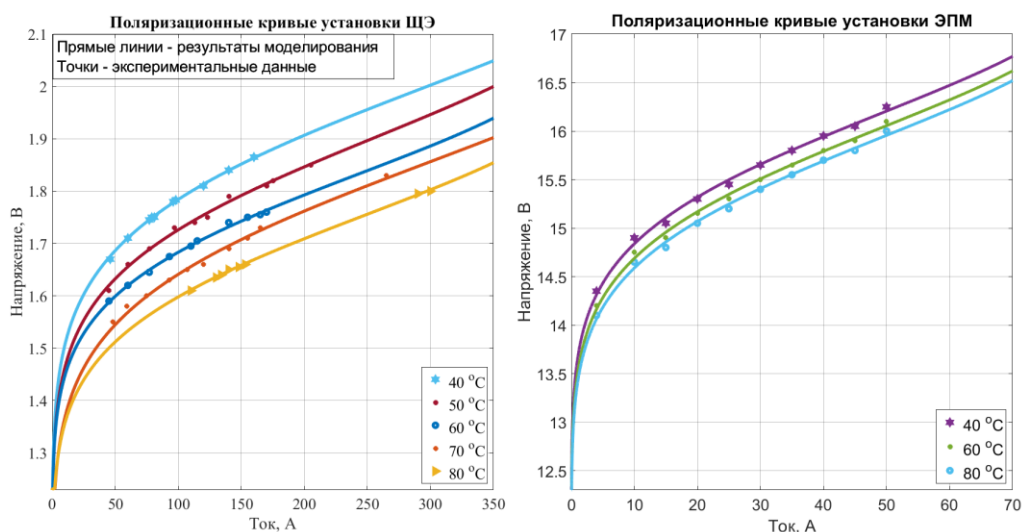


Рис. 6. Верификация результатов моделирования

Таблица 1

Значения нормированной среднеквадратичной ошибки

Температура, °С	Тип установки	
	Щелочной электролизер	Электролизер с протонообменной мембраной
40	0.935666	0.977537
50	0.955586	—
60	0.955586	0.970202
70	0.980023	—
80	0.975527	0.971501

На рис. 7 представлена зависимость объема вырабатываемого водорода от времени для электролизной установки с протонообменной мембраной при температуре питательной воды 80 °С. Данная зависимость свидетельствует о том, что на вход электролизера непрерывно подается постоянный объем жидкости, в результате чего объем генерируемого водорода увеличивается (с постоянной скоростью начиная с определенного момента времени).

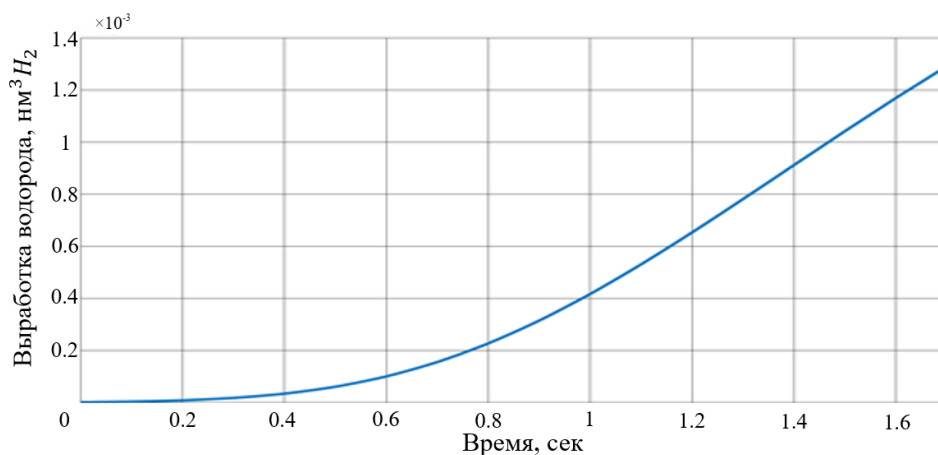


Рис. 7. Зависимость объема выработанного водорода от времени

Система автоматического регулирования температуры питательной воды, поступающей на электролизную установку

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность работы электролизной ячейки с протонообменной мембраной, является ее температура, в основном зависящая от напряжения, генерируемого электролизной ячейкой, и температуры поступающей на нее воды. В связи с тем, что температура питательной воды (электролита) зависит от множества внешних воздействий, основным из которых является нестабильное напряжение источника питания, необходимо обеспечить автоматическую стабилизацию заданного значения температуры рабочей жидкости (воды или электролита).

Для регулирования температуры в электролизере используются два теплообменника. Электролизер сконструирован так, что выходные продукты естественным образом циркулируют в первом теплообменнике, в котором утилизируется тепло, выделяемое водородом и кислородом. Однако теплота выходных продуктов частично рассеивается в окружающую среду, что приводит к недостаточному нагреву питательной воды (электролита), поступающей на вход электролизной установки. Для решения данной проблемы устанавливается второй теплообменник, в который поступает тепловая энергия и в котором происходит дальнейший нагрев исходной воды до требуемой технологическим режимом температуры.

Для управления температурными режимами электролизной установки на измерительную часть поступают сигналы, содержащие информацию о температуре электролизной ячейки и о скорости изменения температуры на входе во второй теплообменник. Температура воды на входе второго теплообменника и электролизной ячейки измеряется с помощью термометров сопротивления, сигналы которых преобразуются в электрические сигналы постоянного тока с использованием нормирующих преобразователей. В установившемся режиме при заданной температуре на выходе из теплообменника сигнал с датчика температуры сравнивается с сигналом задающего устройства, с помощью которого можно изменять температуру, поддерживаемую регулятором.

В случае отклонения текущего значения температуры от заданного сигнал, пропорциональный входному сигналу и имеющий знак, зависящий от отклонения, поступает на вход регулирующего блока, на выходе которого формируется сигнал, управляющий с помощью реверсивного пускового устройства силовыми

цепями исполнительного механизма, связанного с регулирующим клапаном. Регулирующий клапан изменяет расход теплоносителя в теплообменник в сторону ликвидации отклонения температуры от заданной.

Представленная в статье модифицированная структурная модель электролизной установки может использоваться как объект управления в предложенной системе автоматического регулирования, структурная схема которой представлена на рис. 8.

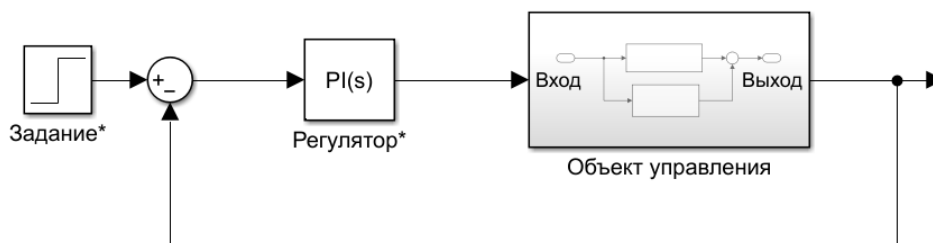


Рис. 8. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры питательной воды электролизной установки

В системе был выбран ПИ-регулятор, поскольку при использовании П-регулятора наблюдается статическая ошибка, равная 10 %, и недопустимое перегуливание, что приводит к перегреву теплоносителя, поступающего на электролизную установку, и кроме того, возникают колебания температуры питательной воды, что отрицательно сказывается на чистоте производимого водорода. Применение ПИД-регулятора приводит к недопустимо высокому показателю колебательности системы.

Для моделирования системы автоматического регулирования в среде ППП MATLAB использовался блок «PIController», позволяющий проводить автоматическую настройку основных параметров регулятора с помощью опции «Tune» в зависимости от выбранного типа переходного процесса (табл. 2).

Таблица 2

Значения параметров ПИ-регулятора

Вид переходного процесса	Коэффициент усиления ПИ-регулятора, K_p	Постоянная времени ПИ-регулятора, T_{II}
Апериодический	0.148	0.035
20% перегуливание	0.293	0.123

При использовании параметров ПИ-регулятора, полученных с использованием автоматической настройки программными средствами ППП MATLAB, получен переходный процесс с 20%-м перегуливанием, характеризующийся достижением заданного значения температуры при $t_{20\%} = 15$ сек, что существенно ускоряет процесс выхода на заданное значение регулируемой величины (рис. 9) по сравнению со случаем применения настроек регулятора для апериодического переходного процесса, при котором в системе возникает 10%-е перегуливание при одновременном значительном увеличении времени переходного процесса ($t_a = 39$ сек).

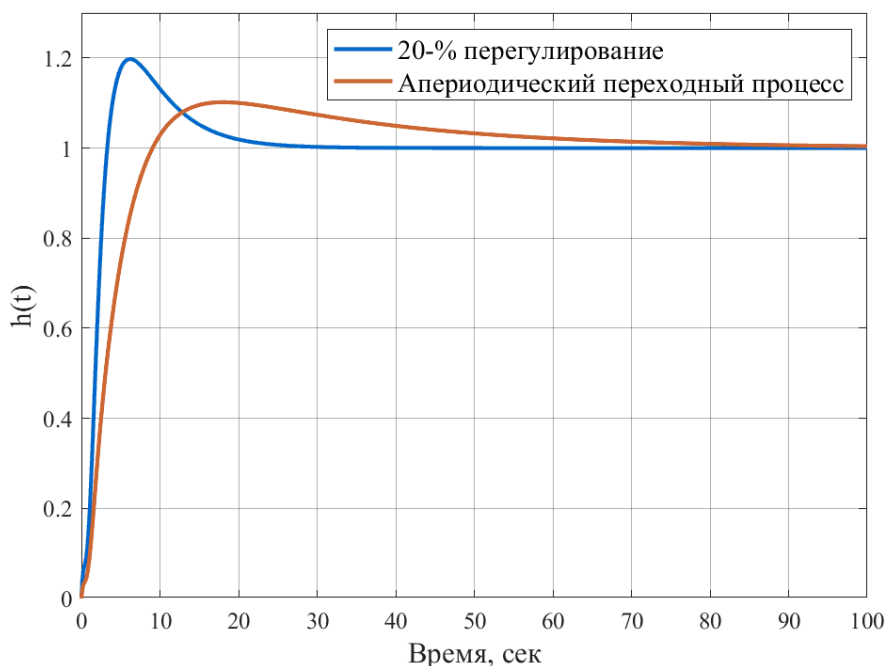


Рис. 9. Переходные характеристики САР температуры питательной воды

Заключение

Проведенный анализ основных технологических направлений производства водорода показал высокий спрос на электролизные технологии, к которым главным образом можно отнести технологии щелочного электролиза и электролиза с протонообменной мембраной. Разработана и верифицирована имитационная структурная модель электролизной генерации водорода, позволяющая установить зависимость между объемом выработанного водорода, температурой электролизной установки и напряжением источника питания. Разработанная система автоматического регулирования температуры электролизной установки способствует более эффективному протеканию данного процесса с точки зрения энергоэффективности.

Полученные результаты исследования могут быть применены в следующих целях:

- проведение многофакторного сравнительного анализа технологий и оценка влияния основных параметров установки на процессы генерации водорода [18];
- повышение энергоэффективности процессов получения водорода на основе технологии электролиза;
- реализация систем оптимального управления электролизной генерацией водорода;
- разработка цифровых двойников электролизных технологий в киберфизических системах управления процессами производства водорода;
- разработка киберфизических систем управления процессами производства водорода;
- расширение научно-исследовательской базы водородной энергетики в будущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tahir Khan, Miao Yu, Muhammad Waseem.* Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. Vol. 47. Is. 60. Pp. 25155–25201.
2. *Thema M., Bauer F., Sterner M.* Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 112. Pp. 775–787.
3. *Nurdiawati A., Urban F.* Towards Deep Decarbonisation of Energy-Intensive Industries: A Review of Current Status // *Technologies and Policies. Energies*, 2021, Vol. 14. P. 2408.
4. *Madadi Avargani Vahid, Zendejboudi Sohrab, Cata Saady Noori M., Dusseault Maurice B.* A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges // *Energy Conversion and Management*, 2022, Vol. 269. P. 115927.
5. *Pleshivtseva Yuliya, Derevyanov Maksim, Pimenov Andrey, Rapoport Alexey.* Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization pathway // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, Vol. 48. Is. 10. Pp. 3703–3724.
6. *Pleshivtseva Yuliya, Derevyanov Maksim, Pimenov Andrey, Rapoport Alexey.* Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the decarbonization pathway. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.264.
7. IEA // *Hydrogen Projects Database*. <https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database> (Дата обращения: 10.04.2023).
8. *Ulleberg Øystein.* Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2003, Vol. 28. Pp. 21–33.
9. *Martinez David, Zamora Ramon.* MATLAB simscape model of an alkaline electrolyzer and its simulation with a directly coupled PV module // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2018. Vol. 8. Pp. 552–560.
10. *Tongzhou Wang, Xuejie Cao, Lifang Jiao.* PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects // *Carb Neutrality*. 2022. Vol. 1, No. 21. 19 p.
11. *Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.Н., Самсонов Р.О., Козлов С.И.* Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2008. № 3. С. 62–69.
12. *Järvinen Lauri, Puranen Pietari, Kosonen Antti, Ruuskanen Vesa, Ahola Jero, Kau-ranen Pertti, Hehemann Michael.* Automated parametrization of PEM and alkaline water electrolyzer polarization curves // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Is. 75. Pp. 31985–32003.
13. *Briguglio N., Brunaccini G., Siracusano S., Randazzo N., Dispenza G., Ferraro M., Ornelas R., Aricò A.S., Antonucci V.* Design and testing of a compact PEM electrolyzer system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Is. 26. Pp. 11519–11529.
14. *Tugirumubano, Alexandre & Shin, Hee&Kwac, Lee & Kim, Hong.* Numerical Simulation of the Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016. Vol. 13. Pp. 94–97.
15. *Beardon A.F.* The Principal Branch of the Lambert W Function // *Computational Methods and Function Theory*. 2021. No. 21. Pp. 307–316.
16. *Smith, Kirsten & Rubin, David & Turner, Martin.* Modelling dynamic response of physical systems in Simulink // 2018 3rd Biennial South African Engineering Conference, Stellenbosch, South Africa, 2018. Pp. 1–4.
17. *Timothy O. Hodson.* Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // *Geoscientific Model Development*. 2022. Vol. 15. Is. 14. Pp. 5481–5487.
18. *Dariush Khezrimotlagh, Joe Zhu, Wade D. Cook, Mehdi Toloo.* Data envelopment analysis and big data // *European Journal of Operational Research*, 2019. Vol. 274. Is. 3. Pp. 1047–1054.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2023 г.

MODELLING AND CONTROL OF HYDROGEN PRODUCTION PROCESSES BASED ON ELECTROLYSIS

E.A. Mironov*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: yaegormir2188@gmail.com

Abstract. Currently, hydrogen is considered as one of the most promising energy carriers, the production of which is possible from various raw materials, including water, natural gas, hydrogen sulphide, coal, etc. The article presents the main results of an analysis of global technological trends in the development of hydrogen generation methods in the period from 2010 to 2038, which aims to identify in-demand and popular technological solutions for hydrogen energy. The analysis is based on the International Energy Agency's database published in October 2022, which contains the most comprehensive information on the key characteristics of 990 hydrogen projects based in sixty countries: output, installed electrical power, carbon dioxide emissions, type of output, stage and timing of implementation. The analysis shows the steady leadership of electrolysis hydrogen generation technologies in the context of the search for the most widespread method of hydrogen production. At the same time, the global hydrogen energy industry has clearly expressed trends towards the increased introduction of alternative (non-electrolysis) technologies in large-scale industrial production. Based on the existing empirical Ullerberg model, a modified universal structural simulation model of hydrogen electrolysis generation in plants with alkaline electrolyzers and with proton exchange membrane has been proposed. The modified model has been developed in MATLAB application package and Simulink dynamic simulation environment using Simscape physical simulation elements. Verification procedure of the developed model showed good agreement of simulation results with the experimental data available in the open sources and obtained at the alkaline electrolysis and proton exchange membrane electrolysis plants. To increase the energy efficiency of hydrogen production process, a single-loop system for automatic regulation of feed water temperature supplied to the proton-exchange membrane electrolysis unit was developed.

Keywords: control system, technology, hydrogen production, electrolysis, structural model, numerical twin, MATLAB, Simulink, proton exchange membrane.

REFERENCES

1. Tahir Khan, Miao Yu, Muhammad Waseem. Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions // International Journal of Hydrogen Energy, 2022. Vol. 47. Is. 60. Pp. 25155–25201.
2. Thema M., Bauer F., Sterner M. Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 112. Pp. 775–787.
3. Nurdawati A., Urban F. Towards Deep Decarbonisation of Energy-Intensive Industries: A Review of Current Status // Technologies and Policies. Energies, 2021, Vol. 14. P. 2408.
4. Madadi Avargani Vahid, Zendejboudi Sohrab, Cata Saady Noori M., Dusseault Maurice B. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges // Energy Conversion and Management, 2022, Vol. 269. P. 115927.



© The Author(s), 2023

* Egor A. Mironov, engineer.

5. *Pleshivtseva Yuliya, Derevyanov Maksim, Pimenov Andrey, Rapoport Alexey.* Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization path-way // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, Vol. 48. Is. 10. Pp. 3703–3724.
6. *Pleshivtseva Yuliya, Derevyanov Maksim, Pimenov Andrey, Rapoport Alexey.* Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the decarbonization pathway. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.264.
7. IEA // *Hydrogen Projects Database*. <https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database> (Дата обращения 10.04.2023).
8. Ulleberg Øystein. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2003, Vol. 28. Pp. 21–33.
9. *Martinez David, Zamora Ramon.* MATLAB simscape model of an alkaline electrolyzer and its simulation with a directly coupled PV module // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2018. Vol. 8. Pp. 552–560.
10. *Tongzhou Wang, Xuejie Cao, Lifang Jiao.* PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects // *Carb Neutrality*. 2022. Vol. 1, No. 21. 19 p.
11. *Grigoriev S.A., Poremsky V.I., Fateyev V.N., Samsonov R.O., Kozlov S.I.* Hydrogen production by electrolysis of water: current status, problems and prospects // *Transport on alternative fuel*. 2008, No. 3. Pp. 62–69. (In Russian)
12. *Järvinen Lauri, Puranen Pietari, Kosonen Antti, Ruuskanen Vesa, Ahola Jero, Kau-ranen Pertti, Hehemann Michael.* Automated parametrization of PEM and alkaline water electrolyzer-polarisation curves // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Is. 75. Pp. 31985–32003.
13. *Briguglio N., Brunaccini G., Siracusano S., Randazzo N., Dispenza G., Ferraro M., Ornelas R., Aricò A.S., Antonucci V.* Design and testing of a compact PEM electrolyzer system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Is. 26. Pp. 11519–11529.
14. *Tugirumubano, Alexandre & Shin, Hee&Kwac, Lee & Kim, Hong.* Numerical Simulation of the Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016. Vol. 13. Pp. 94–97.
15. *Beardon A.F.* The Principal Branch of the Lambert W Function // *Computational Methods and Function Theory*. 2021. No. 21. Pp. 307–316.
16. *Smith, Kirsten & Rubin, David & Turner, Martin.* Modelling dynamic response of physical systems in Simulink // 2018 3rd Biennial South African Engineering Conference, Stellenbosch, South Africa, 2018. Pp. 1–4.
17. *Timothy O. Hodson.* Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // *Geoscientific Model Development*. 2022. Vol. 15. Is. 14. Pp. 5481–5487.
18. *Dariush Khezrimotlagh, Joe Zhu, Wade D. Cook, Mehdi Toloo.* Data envelopment analysis and big data // *European Journal of Operational Research*, 2019. Vol. 274. Is. 3. Pp. 1047–1054.

Original article submitted 17.05.2023

УДК 004.89

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАПОЛНЕНИЕ И АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

В.А. Семенова, С.В. Смирнов*

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

E-mail: queenbfjr@gmail.com

Аннотация. Представлены функциональные возможности и архитектура программной лаборатории для онтологического анализа и через эту «призму» – методология этого анализа. Методический комплекс онтологического анализа и порядок его применения обеспечивают извлечение из данных многомерных наблюдений и измерений предметной области ее семантической модели в виде формальной онтологии – совокупности формальных понятий, каждое из которых определяется объемом и содержанием. Во множестве формальных понятий выявляется частичный порядок (бинарное отношение обобщения) и вскрываются интенциональные отношения, отражающие связи между элементами объемов понятий. От известных инструментальных средств построения формальных онтологий на основе эмпирических объектно-признаковых данных (т. е. на основе данных, представленных в общепризнанной форме протокола регистрации результатов измерений) разработанная программная лаборатория отличается прежде всего учетом реалий накопления информации об исследуемой предметной области. Они в общем случае обуславливают неполноту и противоречивость исходных данных, для обработки которых по необходимости привлечен аппарат многозначной векторной логики. Другим уникальным отличием рассматриваемой программной лаборатории является учет при обработке эмпирических данных априори (до измерений) известных ограничений существования свойств – бинарных отношений обусловленности и несовместимости свойств у объектов исследуемой предметной области. Представляемая программная лаборатория реализована на платформе табличного процессора Excel и языка программирования VBA. Главным мотивом такого выбора было обеспечение доступности и облегчение освоения технологии онтологического анализа данных широким кругом пользователей, использующих Excel в своей профессиональной работе.

Ключевые слова: массовая программная платформа, формальная онтология, онтологический анализ данных, анализ формальных понятий, ограничения существования свойств.



© Автор(ы), 2023

*Валентина Андреевна Семенова, младший научный сотрудник.

Сергей Викторович Смирнов, главный научный сотрудник, доктор технических наук.

Введение

В [1] был анонсирован проект создания в Институте проблем управления сложными системами РАН прототипа программной лаборатории для онтологического анализа данных, получившей наименование OntoWorker (OW). К этому моменту в коллективе потенциальных участников проекта сложилось вполне устойчивое представление об онтологическом анализе данных (ОАД) как о новом методическом комплексе для выявления понятийной структуры, или формальной онтологии, предметной области (ПрО) на основе эмпирической информации, структурированной в виде таблицы «объекты – свойства» (ТОС) [2, 3].

В фундамент ОАД положен метод анализа формальных понятий (АФП), теоретически строго обоснованный в рамках математической теории решеток [4, 5] и вполне отражающий классический логико-философский подход к моделированию фундаментального теоретико-познавательного элемента человеческого сознания – понятия, определяемого объемом и содержанием [6, 7] (формально объем понятия – это множество объектов, каждый из которых характеризуется всяким свойством из набора свойств и только из этого набора, который суть содержание понятия, и наоборот).

Новеллой ОАД стало прежде всего обогащенное методическое обеспечение подготовки контекста для вывода формальных понятий [1]: ввод механизма представления в ТОС эмпирически наблюдаемых отношений между объектами ПрО; учет реалий накопления эмпирической информации, вызывающих неполноту и противоречивость объектно-признаковых данных, интерпретация и консолидация которых возможна лишь в рамках многозначной логики; учет ограничений существования свойств у объектов ПрО. Подобные методические новшества не поддерживались в известных инструментальных средствах анализа данных на базе АФП (см., например, [8–11]), и это определяло актуальность OW-проекта.

Кроме того, в условиях повышенного интереса к семантическому моделированию ПрО актуальной становилась разработка средств онтологического анализа на массовой программной платформе, доступной и освоенной специалистами в самых разных предметных областях. Такой уникальной платформой выделялся табличный процессор Excel, который помимо многих других достоинств характеризуется весьма удобным для разработчиков и пользователей единством среды создания пользовательских приложений и хранения данных [12, 13].

На фоне активного совершенствования методологического базиса ОАД развитие собственно OW-проекта фиксировали публикации [14, 15]. В данной статье очерчивается достигнутый уровень функционального наполнения и архитектурные решения, принятые в апробированной версии программной лаборатории для онтологического анализа данных OntoWorker, помещенной в государственный Реестр программ для ЭВМ (номер регистрации 2022669423, дата 19.10.2022, бюллетень № 10).

1. Реализуемая схема онтологического анализа данных

Функциональное наполнение OW достаточно полно демонстрирует реализуемая в программной лаборатории пошаговая схема ОАД (рис. 1). На схеме отражены взаимосвязи основных информационных «переделов» (шагов) и продуктов ОАД, а кроме того, выделены фрагменты анализа, где поддерживаются когнитивные акты субъекта-исследователя ПрО: 1, 4, 8, 17 – осмысление субъектом, находящимся на определенном этапе решения ОАД-задачи, либо результата

предшествующего, либо результата любого из последующих шагов анализа (фигуру субъекта, которая занимает в двудольной структуре схемы место «продукта», можно интерпретировать как измененное состояние «сознающего ума» [16] суисследователя вследствие полученных результатов анализа).

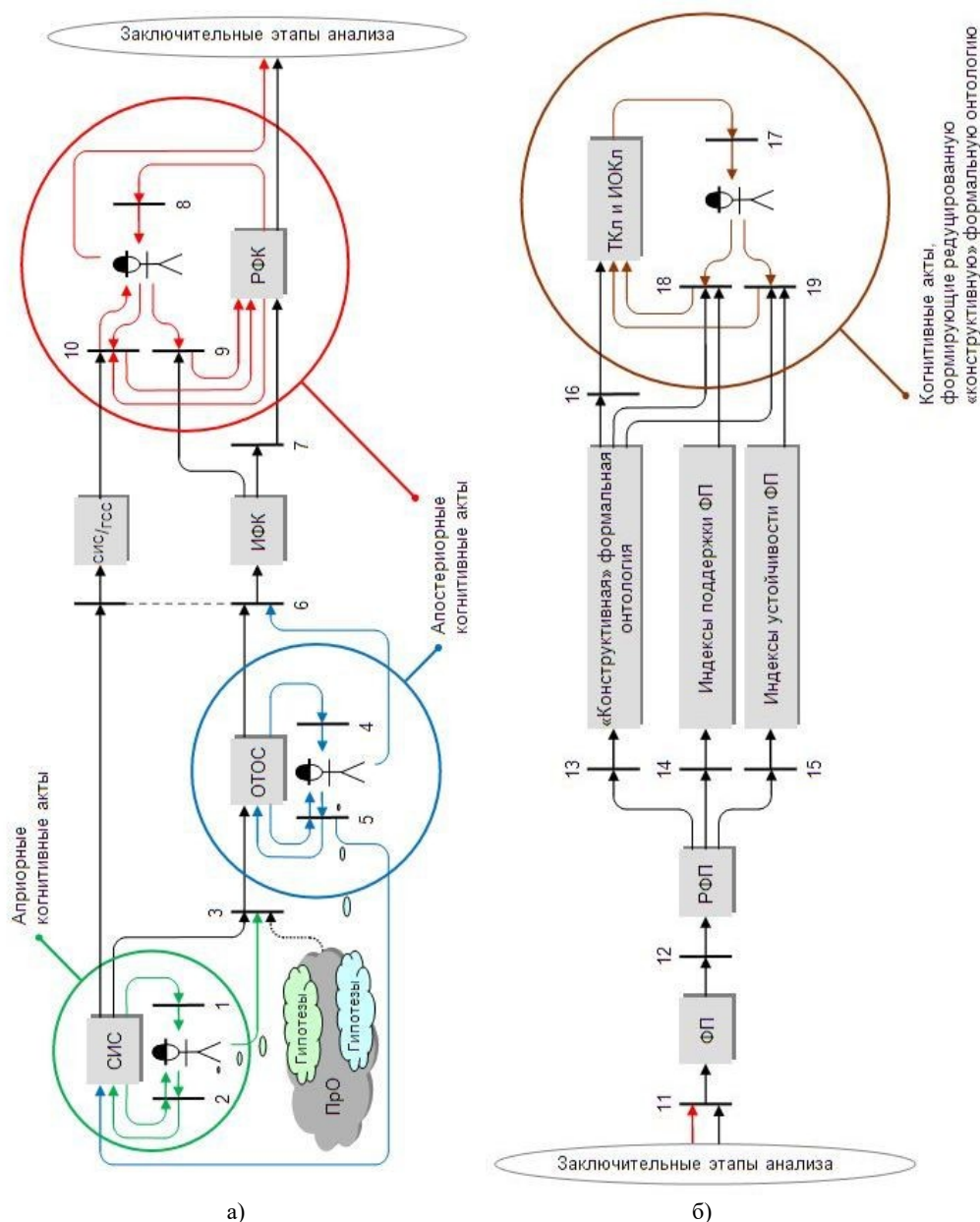


Рис. 1. Пошаговая схема онтологического анализа данных, реализованная в программной лаборатории *OntoWorker*: а – подготовка контекста для извлечения формальных понятий и выполняемые при этом когнитивные акты; б – заключительные этапы анализа и когнитивные акты, управляющие редуцией его основного продукта – «конструктивной» формальной онтологии

Например, 4-й этап может быть инициирован восприятием субъекта и как ОТОС, и как СИС/ГСС, ИФК, РФК или ФП. Для исключения нагромождения

связей такие переходы изображены лишь в пределах выделенных когнитивных актов.

Здесь и на рис. 1 используются следующие аббревиатуры:

ОТОС – обобщенная в ОАД ТОС [1];

СИС – система измеряемых свойств, понимаемая как множество свойств с априорно заданными на нем ограничениями существования – экзистенциальными бинарными отношениями обусловленности и несовместимости свойств у объектов исследуемой ПрО [17, 18];

СИС/ГСС – редуцированное представление СИС в виде множества пересечения групп сопряженных свойств (ГСС), однородных по виду экзистенциального ограничения существования [19];

ИФК – исходный формальный контекст – совокупность объектов измерений, измеряемых свойств и эмпирических оценок истинности базовых семантических суждений (БСС) о ПрО вида «объекту x присуще свойство y », – сформированный непосредственно на основе ОТОС в рамках многозначной векторной логики VTF [20];

РФК – рабочий формальный контекст с однозначными – True или False – оценками БСС, используемый при решении ОАД-задачи;

ФП – формальное понятие;

РФК – решетка формальных понятий – конечное замкнутое множество ФП с заданным на нем бинарным отношением обобщения, являющимся частичным (несовершенным) порядком;

ТКл – таксономия классов объектов – специально определяемая часть РФП – экстенциональная сеть ФП, именуемых классами, используемая для представления формальной онтологии ПрО;

ИОКл – интенциональное отношение классов – воображаемое асимметричное бинарное отношение между ФП, именуемыми классами, которое представляет реально существующее асимметричное бинарное отношение между объектами одного или двух разных классов (множество ИОКл – также часть формальной онтологии ПрО);

2, 5 – формирование и редактирование соответственно СИС и ОТОС, включая концептуальное шкалирование [21] измеряемых свойств. Обратные по отношению к субъекту воздействия связаны с информированием о невозможности выполнить выбранное действие;

3 – измерение (в широком смысле) свойств объектов ПрО;

6 – построение СИС/ГСС и ИФК;

7 – возможная прямая трансформация ИФК в РФК с исключением лишь заведомо ложных БСС [22];

9 – дефазификация ИФК: установка субъективного порога доверия к содержащимся в нем эмпирическим оценкам истинности БСС и обновление РФК путем построения его новой версии как стандартного сечения ИФК с выбранным субъективным порогом доверия;

10 – нормализация РФК – преобразование РФК, в ходе которого снимаются противоречия между эмпирическими данными и априорными ограничениями свойств: множество свойств каждого отдельно взятого объекта измерения нормализуется путем отказа от части эмпирической информации, характеризующейся меньшим значением агрегированного показателя достоверности [22]. Обратное по отношению к субъекту воздействие связано с информированием о невозможности выполнить данное действие;

11, 12 – извлечение из РФК всех ФП и построение РФП;

13 – извлечение формальной онтологии ПрО, «конструктивность» которой означает, что она формируется на основе РФП путем исключения ФП, у которых отсутствуют собственные объем и содержание (то и/или другое лишь наследуется) [1]. В этом смысле «конструктивная» формальная онтология эквивалентна так называемой субиерархии Галуа РФП [23], где множество ФП разделено на непересекающиеся подмножества абстрактных и реальных (data-) классов объектов исследуемой ПрО;

14, 15 – вычисление поддержки и устойчивости ФП [24];

16 – показ извлеченной «конструктивной» формальной онтологии с построением ТКл объектов ПрО и с идентификацией всех ИОКл;

18, 19 – показ «конструктивной» формальной онтологии, осуществляемой построением ТКл при условии, что поддержка/устойчивость включаемых в онтологию классов составляет не менее субъективно указываемого порога, совместно с идентификацией всех ИОКл при указанном пороге поддержки/устойчивости.

Схема на рис. 1 дает представление о функциональности разработанной программной системы с позиции методологии ОАД. Иной ракурс при очерке его функциональности – представление о поведении системы с точки зрения пользователя при его взаимодействии с ней – дает диаграмма вариантов использования из арсенала средств визуального моделирования языка UML [25].

Диаграмма вариантов использования OW (рис. 2) показывает, что единственным действующим лицом по отношению к программной системе является пользователь, играющий роль субъекта-исследователя актуальной ПрО и располагающий следующими способами использования системы:

- получение справочной информации об OW;
- взаимодействие с файловой системой компьютера для загрузки и выгрузки ОАД-задачи – Excel-книги с фиксированной структурой;
- подготовка исходных данных для анализа, включая ввод и редактирование СИС и ОТОС. Эти действия помимо прочего расширяются возможностью концептуального шкалирования измеряемых свойств, которое представлено двумя разновидностями: «дизъюнктивное» замещает шкалируемое свойство набором попарно несовместимых свойств, «уточняющее» добавляет в СИС новое измеряемое свойство, которое становится обуславливающим для определенного ряда других свойств в СИС [26];
- генерация исходных данных для анализа со случайно выбираемыми параметрами СИС и ОТОС с возможностью субъективной коррекции таких параметров;
- документирование ОАД-задачи на листе расширенного описания (ЛРО), включенном в Excel-книгу, размещающую эту задачу;
- построение СИС/ГСС и ИФК, включая их показ;
- формирование РФК, включая его показ. Это действие может быть расширено актом обновления РФК путем дефазификации ИФК с субъективно задаваемым порогом доверия и актом нормализации РФК;
- извлечение множества ФП из РФК, включая показ извлеченных ФП;
- построение РФП, включая ее показ и показ ее транзитивной редукции;
- вычисление поддержки и устойчивости ФП;
- извлечение «конструктивной» формальной онтологии (или ТКл), включая показ ее ТКл, а также показ транзитивной редукции ТКл. Эти действия расширяются за счет возможности формирования и показа «конструктивной» фор-

мальной онтологии, где все data-классы обладают задаваемым уровнем поддержки и/или устойчивости ФП.

В силу ограниченности места на рис. 2 не дана детализация ряда комплексных вариантов использования. Например, редактирование СИС расширяется не только действиями, реализующими концептуальное шкалирование свойства, но и актами добавления, удаления, переименования измеряемых свойств и т. д. [19].

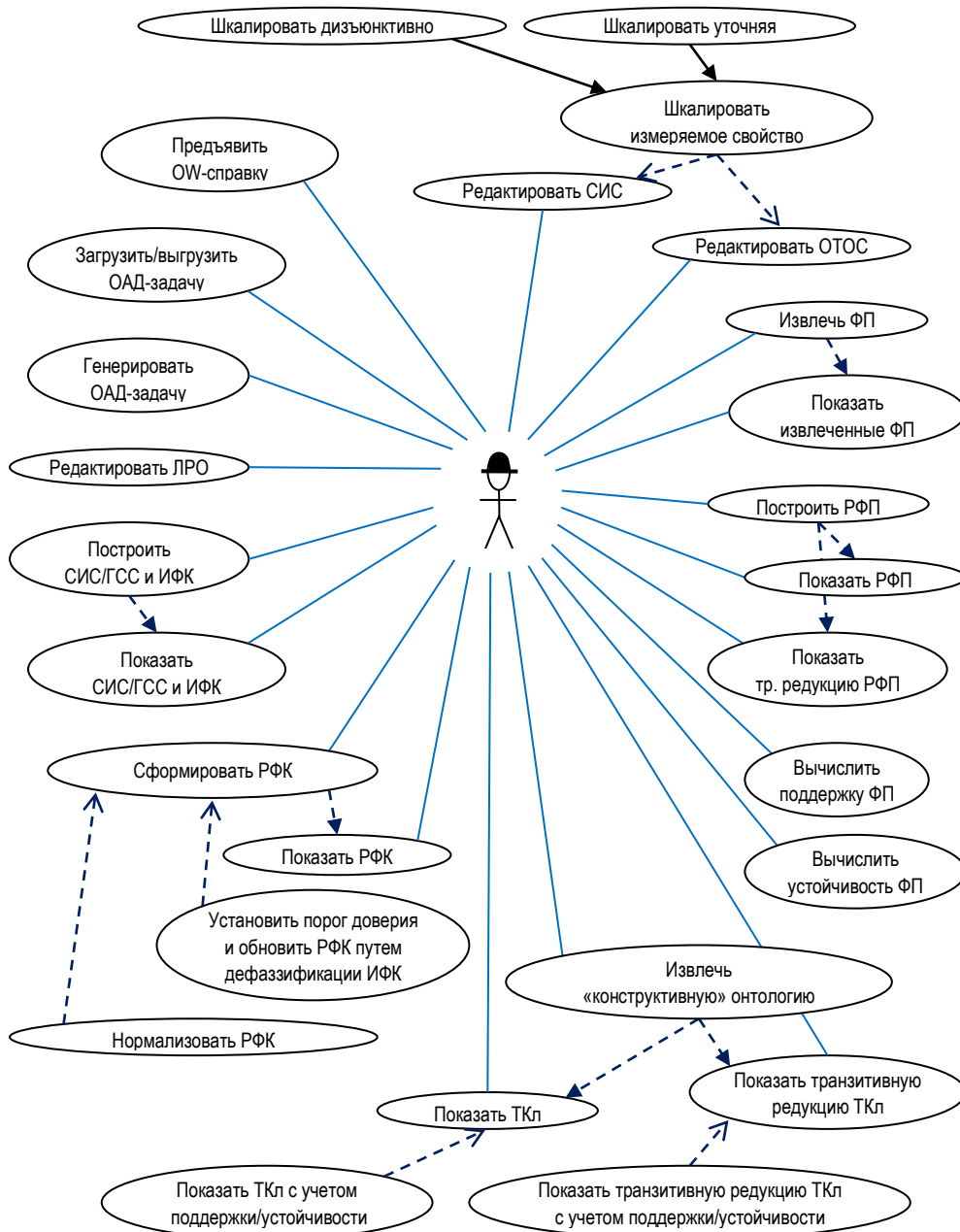


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования программной лаборатории для онтологического анализа данных OntoWorker:

— коммуникация; → обобщение; -.-> включение (include); -.-> расширение (extend)

2. Архитектура программной лаборатории

Программная лаборатория OntoWorker представляет собой защищенную Excel-книгу (OW-книгу), включающую набор рабочих листов, часть из которых жестко структурирована, для представления исходных данных, результатов решения и различной сопровождающей информации ОАД-задачи. Между этими OW-листами возможно свободное перемещение.

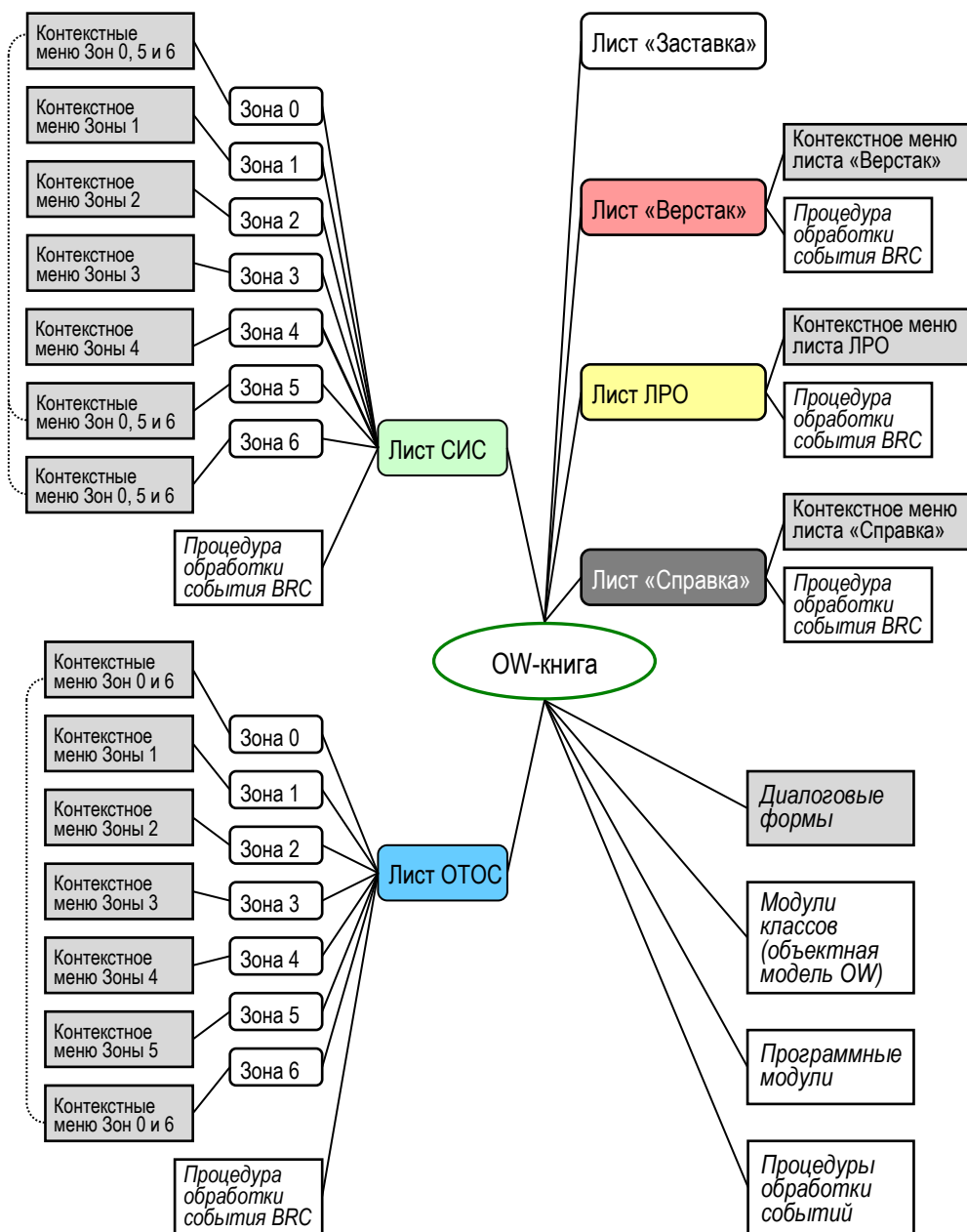


Рис. 3. Архитектура программной лаборатории для онтологического анализа данных OntoWorker

Интеллект-карта [27] на рис. 3 дает представление об архитектуре созданного программного продукта:

- для ввода, редактирования и отображения СИС и ОТОС используются одноименные рабочие листы Excel, которые имеют зонную организацию. Эта организация определяет табличное представление СИС как соответствия «сопряженные пары свойств – свойства» (сопряженная пара свойств – это либо пара несовместимых свойств – Н-пара, либо пара свойств с обусловленностью – О-пара) и табличное представление ОТОС как соответствия «серии измерений – процедуры измерения» [1, 15]. Содержание этих листов защищено, и его изменение возможно только специализированными сервисами, интерфейс к которым осуществляется с помощью различных контекстных меню, локализованных в специализированных зонах этих листов. Наконец, процедура обработки события BRC («Before Right Click») служит здесь и в рамках других OW-листов для вызова контекстных меню, а в случае зонной организации листов – еще и для идентификации зоны, где пользователь кликнул правой кнопкой мыши;

- лист «Справка» содержит справочную информацию о программной лаборатории, включая используемые термины и определения, описание функциональных возможностей и архитектуры OW. Контекстное меню листа ограничивается навигационными задачами;

- лист ЛРО служит для размещения любой информации (тексты, рисунки, мультимедиа и т. п.), сопровождающей загруженную ОАД-задачу. Контекстное меню листа позволяет, в частности, временно снимать его защиту, открывая пользователю возможность редактирования содержания листа ЛРО с помощью всей инструментальной палитры Excel;

- на листе «Верстак» отображаются результаты работы OW. Контекстное меню листа ориентировано прежде всего на предоставление пользователю основных аналитических функций программного приложения, но, в частности, позволяет временно снимать защиту листа для его произвольного редактирования стандартными средствами Excel;

- лист «Заставка» играет исключительно декоративную роль и появляется при открытии OW-книги прежде, чем будет развернут формально основной в программной лаборатории лист СИС;

- наряду с контекстными меню интерактивное взаимодействие пользователя и OW поддерживается с помощью диалоговых форм, а одностороннее – от программных компонентов OW к пользователю – с помощью сообщений;

- объектная модель OW насчитывает почти полтора десятка классов, связанных помимо отношения наследования дюжиной различных интенциональных бинарных отношений (тех, что при описании классов представляют бинарные отношения, в которых состоят экземпляры соответствующих классов, образуя экстенциональную сеть экземпляров);

- функциональные сервисы OW-листов объединены в одноименные программные модули OW-книги. К ним добавлен модуль, содержащий описания разделяемых переменных и сервисов;

- процедуры обработки событий OW-книги служат для реализации надлежащих реакций на ее открытие, закрытие и попытку сохранения (последнее действие некорректно, и OW прекращает работу, прежде предоставляя пользователю возможность сохранить ее результаты).

3. Пример работы программной лаборатории

Для демонстрации работы программной лаборатории OntoWorker использованы объектно-признаковые данные, описывающие инновационные сорта мягкой яровой пшеницы [28]: объектами исследуемой ПрО являются сорта, а также Госреестр, куда включена часть сортов; признаками – характеристики сортов, а также ссылочные свойства (валентности), связывающие сорт и Госреестр.

В адекватной постановке опыт решения задачи онтологического анализа рассматриваемой ПрО представлен в [29]. Здесь же ввиду того, что преследуется цель лишь продемонстрировать работу OW при решении ОАД-задачи, данные о ПрО в части признаков объектов радикально урезаны – во внимание приняты сведения только о засухоустойчивости сортов, их классности (определяется главным образом содержанием белка в зерне) согласно ГОСТ [30] и включении в Госреестр.

На рис. 4 дан фрагмент скриншота листа СИС, где отражены состав и сопряженность учитываемых характеристик сортов пшеницы. О-пары свойств отмечают естественные отношения обусловленности между данными в [28] оценками засухоустойчивости сортов: если сорт «высоко засухоустойчив» (взу), то он и «засухоустойчив» (зу); если он «экстремально засухоустойчив» (эзу), то он и «высоко засухоустойчив», и «засухоустойчив». Н-пары закрепляют установленное ГОСТ [30] разделение пшеницы мягких сортов на пять непересекающихся классов. Представленные в [28] сорта характеризуются в рамках 1–3-го классов, и в СИС фиксируется их несовместимость. Наконец, В-пара описывает сопряженные, или «встречные» валентности объектов (в ОАД валентности описывают потенциальные способности объектов ПрО вступать в связи, реализующие различные несимметричные бинарные отношения): сорт может быть «включен» в Госреестр, а по отношению к некоторому сорту состояние Госреестра может характеризоваться тем, что он «включает» этот сорт.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1			зу	взу	эзу	1 класс	2 класс	3 класс	включает	включён	
2	О-пара	взу - зу	О	X							
3	О-пара	эзу - взу	О		X						
4	О-пара	эзу - зу	О		X						
5	Н-пара	1 класс - 2 класс				X	X				
6	Н-пара	1 класс - 3 класс				X		X			
7	Н-пара	2 класс - 3 класс					X	X			
8	В-пара	включает - включён							X	О	
9											

Рис. 4. Фрагмент скриншота листа СИС программной лаборатории OntoWorker, описывающий задаваемую в задаче онтологического анализа данных систему измеряемых свойств

Фрагмент скриншота листа ОТОС, где зафиксирована фактическая информация о сортах мягкой яровой пшеницы, приведен на рис. 5 [28]. В [28] классность сортов нередко характеризуется отнесением сорта сразу к двум смежным классам ГОСТ с указанием процента зерна того и другого класса. Это отражено в рассматриваемой ОТОС путем задания надлежащих элементов соответствия «объекты – свойства» в виде оценок истинности V^{TF} -логики, в которой вектор $\langle b^+, b^- \rangle$, $b^+, b^- \in [0, 1]$ свидетельствует «за» принадлежность свойства объекту со степенью b^+ и «против» со степенью b^- (в OW степени указываются в процен-

тах). При этом в рассматриваемой ОТОС согласно фактам из [28] выполняется логический принцип исключенного третьего. В общем случае в результате логической интерпретации и консолидации неполных и противоречивых эмпирических данных этот принцип нарушается, но логика V^{TF} вполне адекватна для описания таких ситуаций [1, 20].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	
2				100	100	100	100	100	100	100	100	
3				зу	взу	эзу	1 класс	2 класс	3 класс	включает	включён	
4	s_1	100	Жигулевская	X	X		<80; 20>	<20; 80>			X	
5	s_2	100	Самсар	X			<50; 50>	<50; 50>			X	
6	s_3	100	Тулайковская 5	X			X				X	
7	s_4	100	Тулайковская 10	X	X		X				X	
8	s_5	100	Тулайковская 100	X	X		<80; 20>	<20; 80>			X	
9	s_6	100	Тулайковская золотистая	X	X	X	X				X	
10	s_7	100	Экада 70	X			X				X	
11	s_8	100	Экада 66	X			X				X	
12	s_9	100	Тулайковская 110	X	X		X				X	
13	s_10	100	Тулайковская победа	X	X		<75; 25>	<25; 75>				
14	s_11	100	Тулайковская надежда	X	X			<25; 75>	<75; 25>		X	
15	s_12	100	Тулайковская 116	X	X	X	<83; 17>	<17; 83>				
16	s_13	100	Экада 214	X				<45; 55>	<55; 45>			
17	s_14	100	Завральская волна	X			X					
18	s_15	100	Госреестр							X		
19												

Рис. 5. Фрагмент скриншота листа ОТОС программной лаборатории OntoWorker, описывающий задаваемую в задаче онтологического анализа данных эмпирическую информацию о предметной области в виде обобщенной таблицы «объекты – свойства»: s_i , p_j – имена серий измерений и процедур измерения соответственно; цифры (здесь везде 100) – достоверности серий измерений и степени доверия к процедурам измерения

Рис. 6 демонстрирует фрагмент скриншота листа «Верстак» со сформированным и нормализованным РФК: все непустые элементы соответствия «объекты – свойства» отвечают БСС, принятым как однозначно истинные (**True**), а пустые указывают БСС, признанные ложными (**False**). При формировании этого РФК специального порогового сечения ИФК не проводилось; РФК сформирован из ИФК лишь путем исключения заведомо ложных БСС [22]. Нормализация в данном случае свелась к устранению исходной двусмысленности в определении классности сортов мягкой пшеницы.

	зу	взу	эзу	1 класс	2 класс	3 класс	включает	включён
Жигулевская	<100; 0>	<100; 0>		<80; 20>				<100; 0>
Самсар	<100; 0>			<50; 50>				<100; 0>
Тулайковская 5	<100; 0>			<100; 0>				<100; 0>
Тулайковская 10	<100; 0>	<100; 0>		<100; 0>				<100; 0>
Тулайковская 100	<100; 0>	<100; 0>		<80; 20>				<100; 0>
Тулайковская золотистая	<100; 0>	<100; 0>	<100; 0>	<100; 0>				<100; 0>
Экада 70	<100; 0>			<100; 0>				<100; 0>
Экада 66	<100; 0>			<100; 0>				<100; 0>
Тулайковская 110	<100; 0>	<100; 0>		<100; 0>				<100; 0>
Тулайковская победа	<100; 0>	<100; 0>		<75; 25>				<100; 0>
Тулайковская надежда	<100; 0>	<100; 0>				<75; 25>		<100; 0>
Тулайковская 116	<100; 0>	<100; 0>	<100; 0>	<83; 17>				<100; 0>
Экада 214	<100; 0>					<55; 45>		<100; 0>
Завральская волна	<100; 0>			<100; 0>				<100; 0>
Госреестр							<100; 0>	<100; 0>

Рис. 6. Фрагмент скриншота листа «Верстак» программной лаборатории OntoWorker, описывающий рабочий формальный контекст задачи онтологического анализа данных

Фрагменты скриншота листа «Верстак», приводимые на рис. 7 и рис. 8, *а*, представляют соответственно извлеченное из РФК множество ФП и построенную на этой основе «конструктивную» онтологию. Онтология представлена на рис. 8, *а* двумя таблицами: первая показывает ее в виде транзитивной редукции таксономии классов, вторая описывает интенциональные отношения на классах. Рис. 8, *б* дает содержанию этих таблиц графическую интерпретацию.

Имя	Объём	Содержание
1		зу; взу; эзу; 1 класс; 2 класс; 3 класс; включает; включён
2	Жигулевская; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Тулайковская 110	зу; взу; 1 класс; включён
3	Жигулевская; Самсар; Тулайковская 5; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Экада 70; Экада 66; Тулайковская 110	зу; 1 класс; включён
4	Тулайковская золотистая	зу; взу; эзу; 1 класс; включён
5	Жигулевская; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Тулайковская 110; Тулайковская победа; Тулайковская 116	зу; взу; 1 класс
6	Жигулевская; Самсар; Тулайковская 5; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Экада 70; Экада 66; Тулайковская 110; Тулайковская победа; Тулайковская 116; Зауральская волна	зу; 1 класс
7	Тулайковская надежда	зу; взу; 3 класс; включён
8	Жигулевская; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Тулайковская 110; Тулайковская надежда	зу; взу; включён
9	Жигулевская; Самсар; Тулайковская 5; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Экада 70; Экада 66; Тулайковская 110; Тулайковская надежда	зу; включён
10	Жигулевская; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Тулайковская 110; Тулайковская победа; Тулайковская надежда; Тулайковская 116	зу; взу
11	Жигулевская; Самсар; Тулайковская 5; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Экада 70; Экада 66; Тулайковская 110; Тулайковская победа; Тулайковская надежда; Тулайковская 116; Экада 214; Зауральская волна	зу
12	Тулайковская золотистая; Тулайковская 116	зу; взу; эзу; 1 класс
13	Тулайковская надежда; Экада 214	зу; 3 класс
14	Госреестр	включает
15	Жигулевская; Самсар; Тулайковская 5; Тулайковская 10; Тулайковская 100; Тулайковская золотистая; Экада 70; Экада 66; Тулайковская 110; Тулайковская победа; Тулайковская надежда; Тулайковская 116; Экада 214; Зауральская волна; Госреестр	

Рис. 7. Фрагмент скриншота листа «Верстак» программной лаборатории OntoWorker, описывающий формальные понятия, извлеченные в ходе решения задачи онтологического анализа данных

в части функционального наполнения. Например, здесь можно обозначить следующие задачи:

- построить содержательные процедуры концептуального шкалирования измеряемых свойств при формировании СИС, вводя описание доменов значений свойств. Сейчас это шкалирование осуществляется умозрительно, формируя тем не менее гипотетическую понятийную структуру исследуемой ПрО и пополняя ограничения существования свойств;

- добавить стандартные возможности извлечения из РФК импликаций и ассоциативных правил на признаках [4, 5];

- расширить палитру критериев и методов оценки качества выводимых понятий, включая возможность агрегирования различных критериев, и поддерживать перспективные методики построения «конструктивных» онтологий при редуцировании множества формальных понятий на основе учета их качества по различным критериям;

- интегрировать в программную лабораторию возможности графического представления результатов анализа.

Наконец, учитывая экспоненциальную сложность ряда алгоритмов онтологического анализа и ограниченную производительность интерпретирующей программной платформы, каковой является связка Excel-VBA, оправданно обозначить вопрос о реинжиниринге OntoWorker. Наследуя предложенные архитектурные решения, разумно рассмотреть разнообразные современные возможности в диапазоне от разработки настольного приложения промышленной базы данных на основе мощного средства автоматизации программирования до создания широкодоступного «облачного» сервиса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенова В.А., Смирнов В.С., Смирнов С.В. OntoWorker: программная лаборатория для онтологического анализа данных // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII Международной конференции. Самара: СамНЦ РАН, 2015. С. 382–393.
2. Загоруйко Н.Г. Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Гео, 2013. 186 с.
3. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И., Тесс М.Д., Елизаров С.И. Анализ данных и процессов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
4. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 290 p.
5. Ferré S., Huchard M., Kaytoute M., Kuznetsov S.O., Napoli A. Formal Concept Analysis: From Knowledge Discovery to Knowledge Processing // In: Marquis P., Papini O., Prade H. A Guided Tour of Artificial Intelligence Research. Vol. II: AI Algorithms Springer Int. Publishing, 2020. Pp. 411–445.
6. Философский энциклопедический словарь. М.: ИНФРА-М, 1997. 576 с.
7. Гладкий А.В. Введение в современную логику. М.: URSS, 2022. 240 с.
8. The Concept Explorer. <http://conexp.sourceforge.net> (обращение 07.04.2023).
9. Toscana J. <http://toscanaj.sourceforge.net> (обращение 07.04.2023).
10. Galicia Lattice Builder. <http://www.iro.umontreal.ca/~galicia> (обращение 07.04.2023).
11. Python FCA Tool. <https://github.com/ae-hse/fca> (обращение 07.04.2023).
12. Гарнаев А.Ю., Рудикова Л.В. Microsoft Office Excel 2010: разработка приложений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 528 с.
13. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. М.: И.Д. Вильямс, 2011. 994 с.
14. Зубцов Р.О., Семенова В.А., Смирнов С.В. Алгоритмическое и программное обеспечение онтологического анализа данных // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Материалы VI международной науч.-техн. конференции. Мн: Изд-во БГУИР, 2016. С. 83–88.

15. *Лещева Д.В., Семенова В.А., Смирнов С.В.* Пользовательский интерфейс программной лаборатории для онтологического анализа данных // Перспективные информационные технологии: Тр. международной науч.-техн. конференции. Самара: СамНЦ РАН, 2018. С. 479–482.
16. *Чалмерс Д.* Сознательный ум: в поисках фундаментальной теории. М.: URSS, 2019. 512 с.
17. *Lammari N., Metais E.* Building and maintaining ontologies: a set of algorithms // *Data & Knowledge Engineering*. 2004. Vol. 48(2). Pp. 155–176.
18. *Пронина В.А., Шупилина Л.Б.* Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области // *Проблемы управления*. 2009. № 1. С. 27–32.
19. *Семенова В.А., Смирнов С.В.* Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограничений существования свойств предметной области // *Онтология проектирования*. 2020. Т. 10, № 3. С. 361–379.
20. *Аршинский Л.В.* Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного ун-та, 2007. 228 с.
21. *Ganter B., Wille R.* Conceptual scaling // *Applications of Combinatorics and Graph Theory to the Biological and Social Sciences*. New York Springer-Verlag, 1989. P. 139–167.
22. *Semenova V., Smirnov S.* Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data // VIII Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology. IEEE Xplore. 2022. Pp. 1–5.
23. *Arévalo G., Berry A., Huchard M., Perrot G., Sigayret A.* Performances of Galois Subhierarchy-building Algorithms // *Formal Concept Analysis. ICFCA 2007. Lecture Notes in Computer Science*. Vol 4390. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 166–180.
24. *Kuznetsov S.O.* On stability of a formal concept // *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 49(1–4). Pp. 101–115.
25. *Иванов Д.Ю., Новиков Ф.А.* Моделирование на UML. СПб.: Наука и техника, 2010. 640 с.
26. *Лещева Д.В., Семенова В.А.* Управление данными при кластеризации объектов многомерных наблюдений и экспериментов // Перспективные информационные технологии: Тр. международной науч.-техн. конференции. Самара: СамНЦ РАН, 2020. С. 127–132.
27. *Бьюзен Т., Бьюзен Б.* Интеллект-карты. Практическое руководство. Минск: Попурри, 2010. 368 с.
28. Каталог инновационных разработок Самарского НИИ сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова на 2018 год. Самара: СамНЦ РАН, 2018. 92 с.
29. *Семенова В.А.* Опыт бикластеризации данных о сортах сельскохозяйственных культур // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020. Т. 2, № 1. С. 86–92.
30. ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия. <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293751/4293751950.pdf> (дата обращения: 07.04.2023).

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2023 г.

FUNCTIONAL CONTENT AND ARCHITECTURE OF SOFTWARE LABORATORY FOR ONTOLOGICAL DATA ANALYSIS

V.A. Semenova, S.V. Smirnov*

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russian Federation

E-mail: queenbfjr@gmail.com

Abstract. *The article presents the functionality and architecture of the software laboratory for ontological analysis and through this “prism” – the methodology of this analysis. The methodological complex of ontological analysis and the procedure for its application provide extraction from the data of multidimensional observations and measurements of the knowledge domain of its semantic model in the form of a formal ontology – a set of formal concepts, each of which is determined by extent and intent. In the set of formal concepts, a partial order is revealed (a binary relation of generalization) and intensional relations are revealed that reflect the connections between the elements of the concepts extents. The developed software laboratory differs from the well-known tools for constructing formal ontologies based on empirical object-feature data (i.e., based on data presented in the generally recognized form of a measurement results registration protocol), first of all, by taking into account the realities of accumulating information about the knowledge domain under study. In the general case, they cause the incompleteness and inconsistency of the initial data, for the processing of which the apparatus of multi-valued vector logic is involved. Another unique difference of the software laboratory is the consideration of a priori known (i.e., known before measurements) constraints on the properties existence during the primary processing of empirical data – binary relations of conditionality and incompatibility of objects properties of the studied knowledge domain. The presented software laboratory is implemented on the Excel table processor platform and the programming language Visual Basic for Application. The main motive for this choice was to ensure the availability and facilitate the familiarization of ontological data analysis technology by a very wide range of users who use Excel in their professional work.*

Keywords: *mass software platform, formal ontology, ontological data analysis, formal concept analysis, property existence constraints.*

REFERENCES

1. Semenova V.A., Smirnov V.S., Smirnov S.V. OntoWorker: Program Laboratory for Ontological [Data Analysis] // Proc. of the XVII Int. Conf. Complex Systems: Control and Modeling Problems. Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2015. Pp. 382–393. (In Russian).
2. Zagoruyko N.G. Kognitivnyy analiz dannykh [Cognitive data analysis]. Novosibirsk: Geo Publisher, 2013. 186 p. (In Russian).
3. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Holod I.I., Tess M.D., Elizarov S.I. Analiz dannykh i protsessov [Data and Process Analysis]. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 2009. 512 p. (In Russian).
4. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 290 p.
5. Ferré S., Huchard M., Kaytoute M., Kuznetsov S.O., Napoli A. Formal Concept Analysis: From Knowledge Discovery to Knowledge Processing // In: Marquis P., Papini O., Prade H.



© The Author(s), 2023

* Valentina A. Semenova, Junior Researcher.

Sergey V. Smirnov (Dr. Sci. (Techn.)), Chief Researcher.

- A Guided Tour of Artificial Intelligence Research. Vol. II: AI Algorithms Springer Int. Publishing, 2020. P. 411–445.
6. Filosofskiy entsiklopedicheskiy slovar' [Philosophical Encyclopedic Dictionary]. M.: INFRA-M, 1997. 576 p. (In Russian).
 7. Gladkiy A.V. Vvedeniye v sovremennuyu logiku [Introduction to Modern Logic]. M.: URSS, 2022. 240 p. (In Russian).
 8. The Concept Explorer. <http://conexp.sourceforge.net> (accessed April 07, 2023).
 9. ToscanaJ. <http://toscanaj.sourceforge.net> (accessed April 07, 2023).
 10. Galicia Lattice Builder. <http://www.iro.umontreal.ca/~galicia> (accessed April 07, 2023).
 11. Python FCA Tool. <https://github.com/ae-hse/fca> (accessed April 07, 2023).
 12. Garnaev A.Yu., Rudikova L.V. Microsoft Office Excel 2010: razrabotka prilozheniy [Microsoft Office Excel 2010: Application Development]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2011. 528 p. (In Russian).
 13. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noye programmirovaniye na VBA [Excel 2010: power programming with VBA]. Moscow: Williams, 2011. 994 p. (In Russian).
 14. Zybtsov R.O., Semenova V.A., Smirnov S.V. Algorithmic and software for ontological data analysis // Proc. of the VI Int. Scientific and Technical Conf. "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems". Minsk: BGUIR. 2016. Pp. 83–88. (In Russian).
 15. Leschyova D.V., Semenova V.A., Smirnov S.V. User interface of a software laboratory for ontological data analysis // Proc. Int. Conf. "Perspective information technology". Samara Scientific Center of RAS, 2018. Pp. 479–482. (In Russian).
 16. Chalmers D. Soznayuschiy um: v poiskakh fundamental'noy teorii [The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory]. Moscow: URSS, 2019. 512 p. (In Russian).
 17. Lammari N., Metais E. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms // Data & Knowledge Engineering. 2004. Vol. 48(2). Pp. 155–176.
 18. Pronina V.A., Shipilina L.B. Using the relationships between attributes to build domain ontology // Problemy upravleniya. 2009. No 1. Pp. 27–32. (In Russian).
 19. Semenova V.A., Smirnov S.V. Algorithms for the formation and pragmatic transformation of Existence Constraints // Ontologiya proyektirovaniya. 2020. Vol. 10, no. 3. Pp. 361–379. (In Russian).
 20. Arshinskiy L.V. Vektornye logiki: osnovaniya, kontseptsii, modeli [Vector logics: foundations, concepts, models]. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House. 2007. 228 p. (In Russian).
 21. Ganter B., Wille R. Conceptual scaling. In: Applications of Combinatorics and Graph Theory to the Biological and Social Sciences. New York Springer-Verlag, 1989. Pp. 139–167.
 22. Semenova V., Smirnov S. Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data. VIII Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology. IEEE Xplore. 2022. Pp. 1–5.
 23. Arévalo G., Berry A., Huchard M., Perrot G., Sigayret A. Performances of Galois Subhierarchy-building Algorithms. In: Formal Concept Analysis. ICFA 2007. Lecture Notes in Computer Science. Vol 4390. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 166–180.
 24. Kuznetsov S.O. On stability of a formal concept // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2007. Vol. 49 (1–4). Pp. 101–115.
 25. Ivanov D.Yu., Novikov F.A. Modelirovaniye na UML [Modeling in UML]. St. Petersburg: Nauka i tekhnika. 2010. 640 p.
 26. Leschyova D.V., Semenova V.A. Data Management in Clustering Objects of Multidimensional Observations and Experiments // Proc. Int. Conf. "Perspective information technology". Samara Scientific Center of RAS, 2020. Pp. 127–132. (In Russian).
 27. Buzan T., Buzan B. Intellect-karty. Prakticheskoye rukovodstvo [Mind cards. Practical guide]. Minsk: Poppuri. 2010. 368 p. (In Russian).
 28. Katalog innovatsionnykh razrabotok Samarskogo NII sel'skogo khozyaystva imeni N.M. Tulaykova na 2018 god [Catalog of innovative developments of the Samara Research Institute of Agriculture named after N.M. Tulaykov for 2018]. Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2018. 92 p. (In Russian).
 29. Semenova V.A. Experience of Biclustering Data on Crop Varieties // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoy Akademiyi Nauk. 2020. T. 2, no. 1. Pp. 86–92. (In Russian).
 30. GOST 9353-2016 Pshenitsa. Tekhnicheskiye usloviya [GOST 9353-2016 Wheat. Specifications]. <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293751/4293751950.pdf> (accessed: April 7, 2023).

Original article submitted 17.04.2023

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА КЛАСТЕРНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ В СИСТЕМАХ СМАЗКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, И.Г. Коршиков, Ю.Н. Секисов*

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

E-mail: borovik@iccs.ru, kig770@mail.ru, sekisov@iccs.ru

Аннотация. Контроль наличия металлической стружки в системах смазки энерго-силовых установок является одним из наиболее эффективных способов диагностики состояния подшипниковых узлов машин и механизмов. Наиболее перспективные существующие системы онлайн-мониторинга частиц износа в основном построены на основе вихрековых методов преобразования контролируемых параметров. Это обусловлено способностью таких систем не только определять размер частицы, но и распознавать ее магнитные свойства, что в определенных условиях позволяет локализовать место развития дефекта. В то же время известно, что изменение температуры окружающей среды в зоне контроля является одним из основных внешних факторов, оказывающих существенное влияние на информативные параметры вихрековых преобразователей. Особую значимость указанное обстоятельство приобретает при использовании систем контроля в составе энерго-силовых установок большой мощности (например, в маслосистемах газотурбинных двигателей), где температура окружающей среды (масла) может изменяться в широких пределах ($-50...+160$ °C). В статье исследуется влияние температуры на параметры электрической цепи чувствительного элемента кластерного одновиткового вихрекового датчика металлической стружки, который входит в состав опытного образца стендовой системы непрерывного контроля частиц изнашивания пар трения авиационного газотурбинного двигателя большой тяги. Рас-



© Автор(ы), 2023

*Виктор Александрович Белослудцев, ведущий конструктор лаборатории «Системы сбора и обработки многомерной информации».

Сергей Юрьевич Боровик, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Системы сбора и обработки многомерной информации».

Игорь Геннадьевич Коршиков, младший научный сотрудник лаборатории «Системы сбора и обработки многомерной информации».

Юрий Николаевич Секисов, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории «Системы сбора и обработки многомерной информации».

смачивается типовая конструкция одновиткового чувствительного элемента, приводятся результаты исследований влияния температуры на его индуктивность, а также на параметры токовода, соединяющего чувствительный элемент с согласующим трансформатором и обеспечивающим подключение чувствительного элемента к измерительной цепи. Предлагаются способы снижения влияния воздействия изменений температуры в зоне контроля на параметры электрической цепи чувствительного элемента датчика.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, подшипник, износ, металлическая стружка, система смазки, контроль, кластерный одновитковый вихретоковый датчик, чувствительный элемент, влияние температуры внешней среды, методы снижения влияния.

Введение

Одним из достоверных способов оценки состояния пар трения силовых установок большой мощности, к которым относятся газотурбинные двигатели (ГТД), является контроль наличия металлических частиц износа движущихся частей и механизмов в системах их смазки [1–4]. Очевидно, что в нормальных условиях для новых изделий концентрация частиц износа в масле обычно незначительна, а сами частицы имеют, как правило, небольшие размеры. По мере выработки соприкасающихся элементов и их разрушения концентрация и размеры частиц будут лавинообразно увеличиваться. Так, например, в [5] отмечается, что для рассматриваемых в источнике механических систем величина частиц износа изменялась от 1–20 мкм в штатном режиме функционирования до 50–100 мкм в начале процесса разрушения и далее до размеров свыше 200 мкм в конце жизненного цикла изделий.

Несмотря на существование большого числа методов онлайн-мониторинга наличия металлической стружки в системах смазки силовых установок, основанных на различных физических принципах (оптических, емкостных, индуктивных, ультразвуковых и т. д.), авторы большинства современных публикаций [5–10] сходятся во мнении, что с практической точки зрения наиболее перспективными для решения задач контроля состояния узлов трения силовых установок являются индуктивные методы. В качестве главных преимуществ отмечается способность индуктивных методов определять магнитные свойства обнаруженных металлических частиц износа, что позволяет локализовать место развития дефекта, а также нечувствительность методов к масляно-воздушной среде в зоне измерения. В то же время указывается и основной недостаток методов – малая чувствительность к детектируемым частицам (особенно к неферромагнитным), что ограничивает применение технических средств, реализующих индуктивные методы, в маслопроводах большого диаметра [8, 10, 11].

В работах [10–14] рассматривается вариант создания систем непрерывного контроля частиц износа (СНКЧИ) пар трения на основе кластерных одновитковых вихретоковых датчиков металлической стружки (ДВК) [10, 15], которые, по мнению авторов, свободны от указанных недостатков. ДВК представляет собой многоканальный преобразователь с параллельной обработкой сигналов. Однако в отличие от известных аналогов идеи, заложенные и реализованные в его конструкции [16] и средствах вторичного преобразования сигналов, обеспечили одинаковую чувствительность по всем каналам, большую пропускную способность и информативность датчика, равно как и системы контроля в целом [16–19]. Кроме того, ДВК потенциально инвариантен к размеру (внутреннему диаметру) маслопровода, что пока недоступно ближайшим российским и зарубеж-

ным аналогам подобных систем [6]. При этом практическая разработка ДВК для маслопровода большого диаметра ограничена только допустимыми массогабаритными параметрами изделия.

В рабочих условиях ДВК встраивается в штатную маслосистему ГТД и функционирует в условиях повышенных температур (температура масла в маслопроводе в местах установки датчика может меняться в диапазоне $-50...+160$ °С). Известно, что изменение температуры окружающей среды в зоне контроля является одним из основных внешних факторов, оказывающих существенное влияние на информативные параметры вихретоковых преобразователей [20], что сказывается на достоверности получаемых результатов. Исследованию влияния температуры среды в зоне контроля на параметры электрической цепи чувствительного элемента (ЧЭ) ДВК, а также способам уменьшения такого влияния и посвящена настоящая статья. В частности, рассматривается типовая конструкция одновиткового ЧЭ кольцевого типа, используемого в ДВК, исследуется влияние температуры на его индуктивность, а также на параметры токовода, соединяющего ЧЭ с согласующим трансформатором, обеспечивающим подключение ЧЭ к измерительной цепи (ИЦ). Предлагаются аппаратный и программный способы снижения влияния воздействия изменений температуры окружающей среды в зоне контроля на параметры электрической цепи ЧЭ ДВК.

Типовая конструкция масляного канала ДВК с ЧЭ кольцевого типа

В работах [10–12, 15, 16] достаточно подробно рассматриваются основные положения подхода к обнаружению металлических частиц в потоке масла работающей силовой установки на основе применения ДВК, в котором с целью повышения чувствительности датчика к мелким частицам металла при незначительном увеличении гидравлических потерь в маслопроводе общий поток масла, поступающий в датчик, разделяется на N независимых потоков с меньшей площадью сечения. При этом площадь сечения каждого из N потоков выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, гарантировать, что частица износа не будет задержана (датчик не должен работать как фильтр частиц металла), а с другой – чтобы обеспечить приемлемую чувствительность к самой малой из контролируемых частиц металла. Суммарная площадь сечений всех N потоков выбирается равной площади сечения входного потока в датчик, что позволяет свести к минимуму влияние ДВК на параметры маслосистемы ГТД.

В свою очередь, каждый независимый поток охватывается одиночным витком тока, располагающимся в трубопроводе маслосистемы двигателя и являющимся ЧЭ ДВК. В [11] было показано, что наименьшая неравномерность распределения магнитного поля характерна для симметричных ЧЭ. Поэтому в качестве базовой конструкции ЧЭ ДВК был выбран контур кольцевого типа, который охватывает масляный канал датчика (рис. 1, а).

Немаловажным достоинством кольцевого ЧЭ является и более простая (в сравнении с ЧЭ других форм) технология его изготовления. В то же время следует отметить, что ЧЭ кольцевого типа обладают низкой чувствительностью к детектируемым частицам малого размера, проходящим через геометрический центр плоскости ЧЭ. В результате возникают условия, при которых изменения основного информационного параметра ЧЭ (индуктивности) от влияния внешних факторов могут быть сопоставимы или даже превышать полезный сигнал от частицы металла. На рис. 1, б представлен фрагмент конструкции блока чувствительных элементов ДВК, содержащего один ЧЭ, изготавливаемого по технологии

химического травления, аналогичной технологии изготовления печатных плат. Здесь же показана установка ЧЭ в масляный канал ДВК.

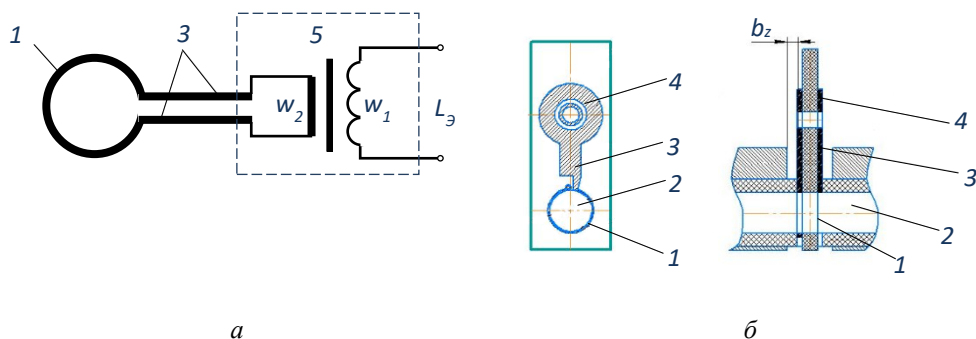


Рис. 1. Одновитковый ЧЭ кольцевого типа: схематическое представление (а) и пример конструкции, установленной в масляный канал ДВК (б): 1 – ЧЭ, 2 – отверстие масляного канала ДВК, 3 – тоководы, 4 – место для установки согласующего трансформатора, 5 – согласующий трансформатор

Поток масла через отверстие в плате ЧЭ формируется маслопроводами во входном и выходном блоках масляного канала (БМК), изготавливаемого из немагнитного металла. Для снижения влияния БМК на индуктивность ЧЭ в масляный канал введены изоляционные вставки, позволяющие отдалить металл БМК от проводника ЧЭ. Часть электрических проводников от кольцевого ЧЭ до согласующего трансформатора (СТ), обеспечивающая передачу напряжения к ЧЭ, условно обозначена как «токовод». Зазор b_z между тоководами и торцевой поверхностью БМК исключает замыкание проводников токовода на корпус блока каналов.

Для преобразования изменений информационного параметра (индуктивности) ЧЭ используется дифференциальная ИЦ на основе трансформаторного моста Блюмлейна, которая обеспечивает нулевой уровень выходного сигнала при отсутствии частицы металла в масляном канале датчика. Для этого в сечение каждого независимого масляного канала дополнительно устанавливается второй аналогичный ЧЭ, смещенный относительно первого по оси канала на заданное расстояние. Последовательное движение частицы металла сначала через контур первого ЧЭ, а затем через контур второго ЧЭ приводит к формированию на выходе ИЦ двух последовательных разнополярных импульсов напряжения. Амплитуда импульсов определяется размером частицы металла и ее местоположением в плоскости контура ЧЭ, а полярность – магнитными свойствами металла частицы.

Модель влияния температуры внешней среды на параметры электрической цепи ЧЭ и токовода

Как уже отмечалось, одним из наиболее существенных внешних факторов, оказывающих значительное влияние на информативные параметры ДВК, является температура окружающей среды в зоне контроля [20]. Исходя из особенностей применения датчиков в энергосиловых установках большой мощности работоспособность ДВК должна сохраняться в диапазоне температур $-50 \dots +160$ °С.

Для оценки влияния температуры окружающей среды на информационный параметр ДВК может быть использована эквивалентная электрическая схема, которая содержит последовательное соединение индуктивностей ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}$) и тоководов ($L_{\text{ТВ}}$), обеспечивающих подключение ЧЭ к ИЦ датчика, и участвует в формировании выходного сигнала.

В этом случае выходной информационный сигнал ИЦ будет определяться эквивалентной индуктивностью цепи ЧЭ $L_{\Sigma} = L_{\text{ЧЭ}} + L_{\text{ТВ}}$.

Представленная на рис. 1 конструкция ЧЭ позволяет сделать прогноз о повышенном влиянии изменений температуры среды как на индуктивность ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}$), так и на индуктивность токовода ($L_{\text{ТВ}}$), которое проявляется через изменения геометрических размеров витка ЧЭ и токовода, а также связано с «экранирующим» эффектом корпусов входного и выходного БМК на проводники токовода при изменении зазора b_z .

Для оценки влияния изменений температуры внешней среды на параметры ЧЭ используется простейшая модель на основе закона Био – Савара [21] и метода конечных элементов [22], связывающая $L_{\text{ЧЭ}}$ с элементами конструкции, которые в наибольшей степени подвержены влиянию температуры. Предполагается, что через плоский медный виток ЧЭ радиусом $R=4$ мм и шириной 0,2 мм протекает ток I с амплитудой 0,1А (рис. 2). В общем случае характер изменения тока во времени $I(t)$ определяется видом напряжения питания ЧЭ (импульсное, гармоническое, постоянное). Так как информационный параметр ЧЭ ($L_{\text{ЧЭ}}$) в идеале не зависит от формы питающего напряжения, то для рассматриваемого случая за ток I примем его максимальное (амплитудное) значение.

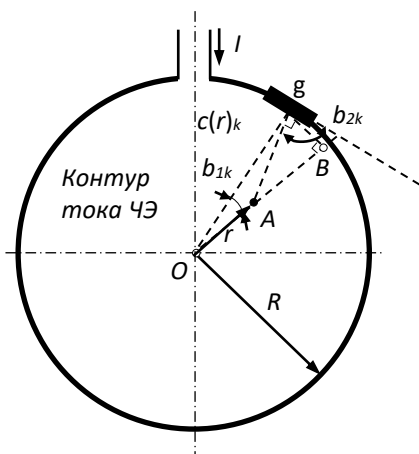


Рис. 2. Простейшая модель контура ЧЭ кольцевого типа

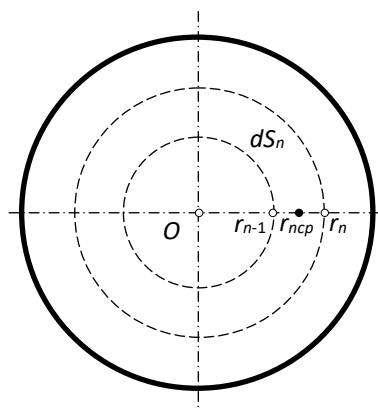


Рис. 3. К вычислению магнитного потока через поверхность, охватываемую контуром ЧЭ

Контур витка разбивается на конечные элементы тока g путем деления в угловом направлении на заданное число криволинейных отрезков K :

$$g = \frac{\pi D}{K}. \quad (1)$$

Тогда в соответствии с законом Био – Савара индукцию магнитного поля в некоторой точке A , находящейся на заданном расстоянии r от центра плоскости контура ЧЭ (см. рис. 2), можно определить из выражения

$$B(r) = \sum_k \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{g}{c(r)_k^2} \sin b_{2k} = Ig \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k \frac{\sin b_{2k}}{c(r)_k^2}, \quad (2)$$

где $b_{2k} = \frac{2\pi}{K} \cdot k$ – угловое положение k -го конечного элемента; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\Gamma H}{M}$ – магнитная проницаемость воздуха;

$$c(r)_k^2 = (R \cos b_{1k} - r)^2 + (R \sin b_{1k})^2. \quad (3)$$

Индуктивность ЧЭ определяется известным выражением [23]

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad (4)$$

где $\Phi = \int_S B dS$ – магнитный поток через поверхность S , охватываемую контуром тока ЧЭ.

Для вычисления магнитного потока численным способом выделим на поверхности S , охватываемой контуром ЧЭ, N концентрических окружностей, каждая из которых соответствует линии постоянной индукции (рис. 3). Для рис. 3 площадь кольца равна

$$dS_n = \frac{\pi}{4} (r_n^2 - r_{n-1}^2). \quad (5)$$

Примем, что величина индукции магнитного поля для кольца равна среднему значению индукции $B(r_{ncp})$ на радиусах r_n и r_{n-1} :

$$B(r_{ncp}) = \frac{B(r_n) + B(r_{n-1})}{2}. \quad (6)$$

Тогда магнитный поток $d\Phi_n$ через элементарную площадку dS_n равен

$$d\Phi_n = B(r_{ncp}) dS_n = B(r_{ncp}) \frac{\pi}{4} (r_n^2 - r_{n-1}^2). \quad (7)$$

В свою очередь, величина магнитного потока через всю площадь S определится выражением

$$\Phi = \frac{\pi}{4} \sum_n^N B(r_{ncp}) (r_n^2 - r_{n-1}^2). \quad (8)$$

С учетом (2), (6) выражение (8) для потока Φ можно записать как

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\pi}{4} \sum_n^N \frac{Ig \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k \frac{\sin b_{2k}}{c(r_n)_k^2} + Ig \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k \frac{\sin b_{2k}}{c(r_{n-1})_k^2}}{2} (r_n^2 - r_{n-1}^2) = \\ &= Ig \frac{\mu_0}{32} \sum_n^N \left(\sum_k^K \frac{\sin b_{2k}}{c(r_n)_k^2} + \sum_k^K \frac{\sin b_{2k}}{c(r_{n-1})_k^2} \right) (r_n^2 - r_{n-1}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда на основании (4) индуктивность ЧЭ будет равна

$$L_{ЧЭ} = g \frac{\mu_0}{32} \sum_n^N \left(\sum_k^K \frac{\sin b_{2k}}{c(r_n)_k^2} + \sum_k^K \frac{\sin b_{2k}}{c(r_{n-1})_k^2} \right) (r_n^2 - r_{n-1}^2). \quad (10)$$

Для оценки влияния температуры на индуктивность ЧЭ определим изменения его диаметра для граничных температур рабочего диапазона $-50 \dots +160$ °C относительно «нормальных» условий (+20 °C).

Из (2), (3) следует, что изменение индукции магнитного поля в плоскости витка ЧЭ имеет квадратичную зависимость в радиальном направлении от центра к периферии. В частности, для типовой конструкции ЧЭ кольцевого типа радиусом $R = 4,0$ мм, выполненного из медной фольги, по которому протекает ток

с амплитудой 0,1 А, индукция магнитного поля на внутренней границе витка ($r = 3,9$ мм) будет более чем в 80 раз превосходить индукцию поля в центре ЧЭ ($r = 0$) (рис. 4).

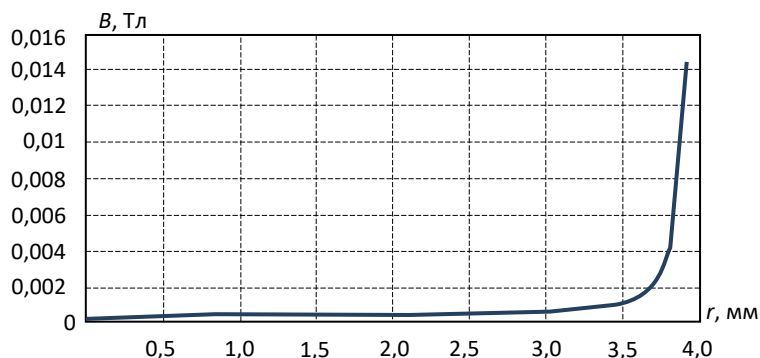


Рис. 4. Изменение индукции магнитного поля в плоскости витка ЧЭ ($R=3,9$ мм) в радиальном направлении от центра к периферии

Очевидно, что изменения температуры в зоне контроля, приводящие даже к незначительным изменениям геометрии (диаметра) витка ЧЭ в области самой высокой индукции, в итоге являются причиной существенных изменений магнитного потока и индуктивности ЧЭ в целом. Это демонстрируют и результаты вычислительного эксперимента, приведенные в табл. 1. В рассматриваемом случае предполагалось, что через центр кольцевого ЧЭ проходит неферромагнитная (медная) частица металла с эквивалентным диаметром 0,3 мм. Расчет проводился для нормальных условий ($\theta = +20$ °С), а также на границах рабочего диапазона температур (-50 °С, $+160$ °С).

Таблица 1

Изменения индуктивности ЧЭ кольцевого типа, обусловленные влиянием температуры в зоне контроля

θ , °С	Диаметр ЧЭ, мм	$L_{\text{ЧЭ}}$, нГн	$\Delta = L_{\text{ЧЭ},\theta} - L_{\text{ЧЭ},20}$, нГн	$\delta L(\theta)$, %	$\delta L(\text{ЧМ}_{03})$, %	$\frac{\delta L(\theta)}{\delta L(\text{ЧМ}_{03})}$
20	8,00	67,176	—	—	—	—
-50	7,967	55,684	-11,492	-17,107	0,017	1007
+160	8,064	90,161	22,984	34,214	0,017	2015

Как видно из представленных данных, изменения индуктивности ЧЭ от влияния температуры превышают уровень полезного сигнала от частицы металла более чем на три порядка.

Далее оценивается влияние изменений температуры окружающей среды на параметры токовода (см. рис. 1), проводники которого находятся в непосредственной близости от поверхности корпусов БМК (зазор b_z между проводником токовода и поверхностью БМК обычно составляет порядка 0,1 мм). Это приводит к возникновению в электропроводном материале БМК интенсивных вихревых токов; как следствие, собственная индуктивность токовода ($L_{\text{ТВ}}$) также меняется.

Как было показано ранее (см. рис. 4), зона, приближенная к проводнику с током, характеризуется наибольшей индукцией магнитного поля. В этой связи следует ожидать, что изменения b_z , вызванные температурными деформациями элементов корпуса БМК, приведут к существенным изменениям индуктивности $L_{ТВ}$. При этом базовой поверхностью, от которой будет происходить температурная деформация корпуса БМК, является наружная поверхность проводника токовода. Кроме того, температура в зоне контроля будет влиять и на геометрические параметры (прежде всего длину) самого токовода, что также является причиной изменений его индуктивности $L_{ТВ}$.

Результаты вычислительных экспериментов по оценке изменений индуктивности токовода $L_{ТВ}$, обусловленных температурными изменениями зазора между проводником токовода и БМК, равно как и температурными изменениями геометрических размеров (длины) самого токовода, представлены в табл. 2, 3 соответственно.

В экспериментах предполагалось, что ЧЭ и токовод выполнены из медной фольги, а БМК – из алюминиевого сплава Д16. Внутренний диаметр ЧЭ составлял 8,0 мм, длина токовода была выбрана равной 7,5 мм, ширина – 2 мм. Исходная индуктивность токовода $L_{ТВ}$ была определена экспериментально для различных b_z на специально изготовленном макете платы ЧЭ с использованием RLC-измерителя Е7-12. Эмпирическая зависимость $L_{ТВ}(b_z)$ была аппроксимирована алгебраическим полиномом 3-й степени $L_{ТВ}(b_z) = 0,167b_z^3 - 0,474b_z^2 + 0,647b_z + 4,519$. Для оценки изменений индуктивности токовода из-за температурных изменений его геометрических размеров использовалась простейшая модель вычисления индуктивности бесконечно тонкого линейного проводника плоского сечения [24].

Таблица 2

Изменения индуктивности токовода, обусловленные влиянием температуры на элементы конструкции БМК

$\theta, ^\circ\text{C}$	$b_z, \text{мм}$	$\Delta b_z, \text{мм}$	$L_{ТВ,1}, \text{нГн}$	$\Delta L_{ТВ,1}, \text{нГн}$
20	0,1	0	4,03	0
-50	0,099832	-0,000168	4,0299328	-0,0000672
+160	0,100336	0,000336	4,0301344	0,0001344

Таблица 3

Изменения индуктивности токовода, обусловленные температурными изменениями его геометрических размеров

$\theta, ^\circ\text{C}$	$l_{ТВ}, \text{мм}$	$\Delta l_{ТВ}, \text{мм}$	$L_{ТВ,2}, \text{нГн}$	$\Delta L_{ТВ,2}, \text{нГн}$
20	7,5	0	4,03	0
-50	7,46955	-0,03045	4,0136382	-0,0163618
+160	7,5609	0,0609	4,0627236	0,0327236

Таким образом, суммарное изменение индуктивности токовода $L_{ТВ} = L_{ТВ,1} + L_{ТВ,2}$, обусловленное изменяющейся температурой среды в зоне контроля в диапазоне $-50 \dots +160 ^\circ\text{C}$, составляет порядка 0,049 нГн, или 0,69 % от величины эквивалентной индуктивности цепи ЧЭ ($L_{\Sigma} = L_{ЧЭ} + L_{ТВ}$). Это более чем на порядок превышает изменения индуктивности ЧЭ ($L_{ЧЭ}$) при его взаимодействии с неферромагнитной частицей наименьшего контролируемого размера 0,3 мм.

Способы уменьшения влияния воздействия температуры окружающей среды в зоне контроля на параметры электрической цепи ЧЭ ДВК

Традиционно в системах измерения и контроля состояния сложных технических объектов на основе ОВТД или их кластерных разновидностей, которым является ДВК, используются схемно-технические методы снижения дополнительной температурной погрешности датчиков, которые подразумевают устранение воздействия внешних дестабилизирующих факторов (в рассматриваемом случае – температуры) путем использования дополнительных термозависимых сигналов [25, 26]. В частности, для преобразования изменений выходного параметра (индуктивности) датчика в процессе взаимодействия с объектом контроля используют дифференциальные ИЦ, в смежные плечи которых включают два идентичных по параметрам ЧЭ. Первый ЧЭ (ЧЭ-Р) выполняет рабочие функции и непосредственно взаимодействует с объектом контроля, а второй ЧЭ (ЧЭ-К) – компенсационные функции. При этом ЧЭ-К вводится в зону измерения с таким расчетом, чтобы температурные условия для него и ЧЭ-Р были идентичными, но при этом электромагнитного взаимодействия с объектом контроля не происходило.

На рис. 5 приведен вариант такой дифференциальной ИЦ применительно к рассматриваемой задаче контроля частиц износа пар трения в системе смазки силовой установки на основе применения ДВК с ЧЭ кольцевого типа.

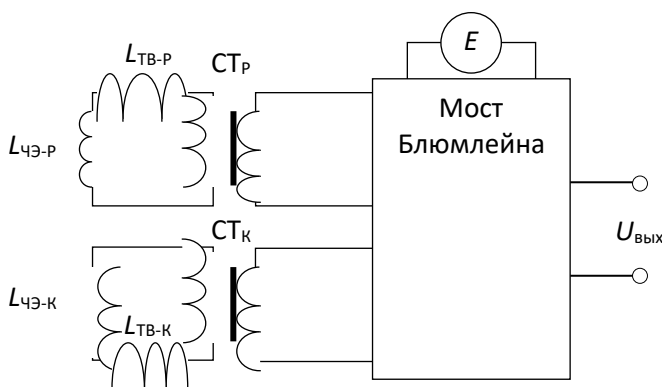


Рис. 5. Схема дифференциальной ИЦ с ЧЭ-Р и ЧЭ-К ДВК

Уравнение преобразования для представленной ИЦ имеет вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \frac{K_{\text{СТ-Р}}(L_{\text{ТВ-Р}} + L_{\text{ЧЭ-Р}}) - K_{\text{СТ-К}}(L_{\text{ТВ-К}} + L_{\text{ЧЭ-К}})}{K_{\text{СТ-Р}}(L_{\text{ТВ-Р}} + L_{\text{ЧЭ-Р}}) + K_{\text{СТ-К}}(L_{\text{ТВ-К}} + L_{\text{ЧЭ-К}})}, \quad (11)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение на выходе ИЦ; E – э.д.с. источника питания; $L_{\text{ЧЭ-Р}}$, $L_{\text{ЧЭ-К}}$ – индуктивности рабочего и компенсационного ЧЭ; $L_{\text{ТВ-Р}}$, $L_{\text{ТВ-К}}$ – индуктивности рабочего и компенсационного тоководов; $K_{\text{СТ-Р}}$, $K_{\text{СТ-К}}$ – коэффициенты трансформации рабочего и компенсационного СТ.

С учетом изменяющихся от температуры индуктивностей ЧЭ ($\Delta L_{\text{ЧЭ-Р},\theta}$, $\Delta L_{\text{ЧЭ-К},\theta}$) и тоководов ($\Delta L_{\text{ТВ-Р},\theta}$, $\Delta L_{\text{ТВ-К},\theta}$), а также при допущении равенства $K_{\text{СТ-Р}} = K_{\text{СТ-К}}$ уравнение (11) примет вид

$$U_{\text{ВЫХ}}(\theta) = E \frac{(L_{\text{ТВ-Р}} - L_{\text{ТВ-К}}) + (L_{\text{ЧЭ-Р}} - L_{\text{ЧЭ-К}}) + (\Delta L_{\text{ЧЭ-Р},\theta} - \Delta L_{\text{ЧЭ-К},\theta}) + (\Delta L_{\text{ТВ-Р},\theta} - \Delta L_{\text{ТВ-К},\theta})}{(L_{\text{ТВ-Р}} + L_{\text{ТВ-К}}) + (L_{\text{ЧЭ-Р}} + L_{\text{ЧЭ-К}}) + (\Delta L_{\text{ЧЭ-Р},\theta} + \Delta L_{\text{ЧЭ-К},\theta}) + (\Delta L_{\text{ТВ-Р},\theta} + \Delta L_{\text{ТВ-К},\theta})}. \quad (12)$$

При допущении хорошей идентичности параметров рабочего и компенсационного ЧЭ и тоководов можно принять $\Delta L_{\text{ЧЭ-Р},\theta} \approx \Delta L_{\text{ЧЭ-К},\theta}$ и $\Delta L_{\text{ТВ-Р},\theta} \approx \Delta L_{\text{ТВ-К},\theta}$. Тогда выражение (12) может быть преобразовано к виду

$$U_{\text{вых}}(\theta) = E \frac{(L_{\text{ТВ-Р}} - L_{\text{ТВ-К}}) + (L_{\text{ЧЭ-Р}} - L_{\text{ЧЭ-К}})}{(L_{\text{ТВ-Р}} + L_{\text{ТВ-К}}) + (L_{\text{ЧЭ-Р}} + L_{\text{ЧЭ-К}}) + (\Delta L_{\text{ЧЭ-Р},\theta} + \Delta L_{\text{ЧЭ-К},\theta}) + (\Delta L_{\text{ТВ-Р},\theta} + \Delta L_{\text{ТВ-К},\theta})}. \quad (13)$$

Как видно из (13), в числителе уравнения преобразования ИЦ отсутствуют составляющие изменения индуктивностей ЧЭ и тоководов, вызванные изменением температуры окружающей среды в зоне контроля, что свидетельствует о «подавлении» негативного влияния температурных изменений индуктивностей указанных элементов ДВК на формирование информационного сигнала цепи. Однако составляющие изменения индуктивностей ЧЭ и тоководов от температуры (пусть и существенно меньше собственных значений индуктивностей ЧЭ и тоководов) остались в знаменателе выражения (13), что свидетельствует о том, что компенсация температурного влияния на элементы дифференциальной ИЦ остается неполной и требуются дополнительные меры по дальнейшему уменьшению такого влияния. Ниже рассматриваются аппаратный способ снижения температурного дрейфа сигналов ИЦ с включенным в нее ЧЭ кольцевого типа.

Способ основан на существенном различии спектра сигнала на выходе ИЦ при прохождении контура ЧЭ частицей металла и спектра составляющей сигнала, связанной с изменениями температуры окружающей среды в зоне контроля. Аппаратная реализация способа предусматривает предварительное усиление выходного сигнала ИЦ (блок предварительных усилителей БПУ), выделение из него медленно изменяющейся составляющей $U(\theta)$, обусловленной воздействием температуры на элементы ЧЭ и ИЦ, и последующее вычитание выделенной составляющей из исходного информационного сигнала в блоке нормализации БН.

Способ поясняет функциональная схема на рис. 6.

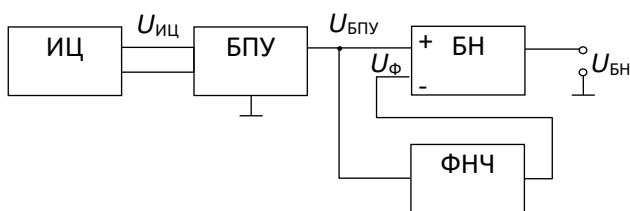


Рис. 6. Схема, поясняющая аппаратный способ компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ИЦ

Для выделения медленно изменяющейся составляющей $U(\theta)$ использован фильтр нижних частот (ФНЧ) с постоянной времени порядка нескольких сотен миллисекунд. ФНЧ может быть реализован на операционном усилителе, постоянная времени подбирается экспериментально. На выходе ФНЧ формируется сигнал в виде напряжения U_{ϕ} , изменения которого обусловлены только влиянием температуры окружающей среды на элементы ДВК и ИЦ. Напряжение U_{ϕ} подается на инвертирующий вход БН, разностный сигнал на выходе которого ($U_{\text{БН}} = U_{\text{БПУ}} - U(\theta)$) будет содержать только быстро изменяющиеся составляющие, обусловленные изменением индуктивности ЧЭ при прохождении его контура контролируемыми частицами металла. Составляющая, связанная с темпера-

турным дрейфом индуктивности ЧЭ и тоководов, в $U_{\text{БН}}$ будет практически отсутствовать.

Работоспособность способа была проверена экспериментально на специально изготовленном стенде, содержащем помимо указанных на рис. 6 блоков (БПУ, ФНЧ и БН) 14-разрядный выносной модуль АЦП E14-440 [27] и ПЭВМ. Один из каналов макетного образца ДВК подключался к БПУ. Нагрев датчика осуществлялся горячим воздухом от строительного фена с регулируемой температурой. Прохождение частицы металла имитировалось с помощью «продергивания» через подключенный к БПУ масляный канал щупа, содержащего тестовую медную частицу с эквивалентным диаметром 0,3 мм. Частота дискретизации АЦП составляла 20 кГц. Коды АЦП фиксировались в памяти ПЭВМ с помощью специально разработанного ПО и далее обрабатывались в пакете MS Excel.

На рис. 7, 8 представлен сигнал на выходе БН в виде зависимости цифрового кода АЦП (C) от времени при отключенной (рис. 7) и включенной (рис. 8) аппаратной коррекции температурного дрейфа. Сигнал содержит одиночный импульс, характеризующий прохождение через контур ЧЭ медной частицы с эквивалентным диаметром 0,3 мм. Помимо полезной составляющей в информационном сигнале содержатся шумовая составляющая, которая в «идеальных» лабораторных условиях невелика (± 3 ед. кода), и составляющая температурного дрейфа, изменение которой на участке 130 мс составило 24 единицы кода.

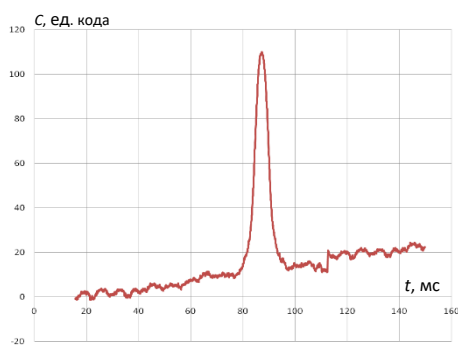


Рис. 7. Сигнал на выходе БН при прохождении тестовой частицы металла через контур ЧЭ (аппаратная коррекция температурного дрейфа отключена)

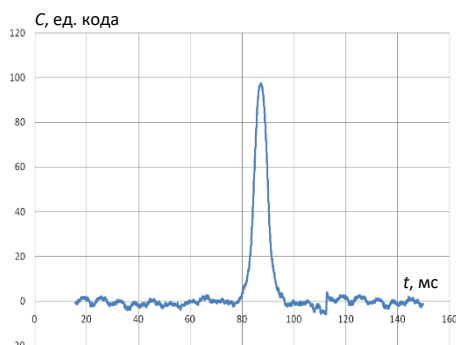


Рис. 8. Сигнал на выходе БН при прохождении тестовой частицы металла через контур ЧЭ (аппаратная коррекция температурного дрейфа включена)

Как видно из представленных осциллограмм, предложенный способ достаточно эффективно ослабляет составляющую температурного дрейфа информационного сигнала ИЦ. Дальнейшее снижение влияния температурной составляющей осуществляется на основе алгоритмических способов стабилизации постоянной составляющей информационного сигнала, которые предполагают анализ статистического распределения кодов, соответствующих выходному сигналу ИЦ, выбор в качестве искомого значения постоянной составляющей элемента с наибольшей частотой появления в указанной выборке либо реализуют вариант простого КИХ-фильтра скользящего среднего [28]. При этом исследование влияния на работу алгоритмов стохастического аппаратного шума, наличия в анализируемых выборках фрагментов полезного сигнала, а также изменений сигнала

в условиях воздействия гармонической помехи показало, что наиболее предпочтительным для реализации в подобного рода системах контроля наличия частиц изнашивания в маслопроводах энергосиловых установок является вариант обработки на основе фильтра скользящего среднего. В частности, в [28] показано, что в указанных условиях погрешность стабилизации постоянной составляющей информационного сигнала на выходе ИЦ при использовании фильтра скользящего среднего в два раза меньше, чем та же погрешность при алгоритмической стабилизации на основе гистограммы.

Заключение

Для типовой конструкции ДВК, который входит в состав опытного образца СНКЧИ пар трения авиационного ГТД большой тяги, проведены исследования влияния на параметры электрической цепи ЧЭ и токовода датчика одного из наиболее существенных внешних факторов – температуры среды (масла) в зоне контроля. В частности, показано, что изменение индуктивности ЧЭ, обусловленное влиянием изменяющейся в диапазоне $-50...+160$ °C температуры, превышают уровень полезного сигнала от неферромагнитной частицы металла наименьшего контролируемого размера с эквивалентным диаметром 0,3 мм более чем на три порядка. В свою очередь, суммарное изменение индуктивности токовода, обусловленное изменяющейся температурой среды в зоне контроля в том же диапазоне температур, более чем на порядок больше изменения индуктивности ЧЭ при взаимодействии с аналогичной неферромагнитной частицей наименьшего контролируемого размера.

Рассмотрены аппаратный и алгоритмический способы снижения влияния температурного дрейфа выходного сигнала измерительной цепи с одновитковым ЧЭ на результат преобразования искомым диагностических характеристик. Аппаратный способ основан на существенном различии спектра сигнала на выходе ИЦ при прохождении контура ЧЭ частицей металла и спектра составляющей сигнала, связанной с изменениями температуры окружающей среды в зоне контроля. Его реализация предусматривает предварительное усиление выходного сигнала ИЦ, выделение из него медленно изменяющейся составляющей выходного сигнала, обусловленной воздействием температуры на элементы ЧЭ и ИЦ, с последующим вычитанием выделенной составляющей из исходного информационного сигнала в блоке нормализации.

Алгоритмические способы стабилизации постоянной составляющей информационного сигнала, изменения которой обусловлены влиянием температуры, предполагают анализ статистического распределения кодов, соответствующих выходному сигналу ИЦ, выбор в качестве искомого значения постоянной составляющей элемента с наибольшей частотой появления в указанной выборке либо реализуют вариант простого КИХ-фильтра скользящего среднего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Miller J., Kitaljevich D.* In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment // IEEE Aerosp. Conf. Proc. 2009. V. 6. Pp. 49–56.
2. *Peng Y., Wu T., Wang S., Peng Z.* Wear state identification using dynamic features of wear debris for on-line purpose // Wear. 2017. V. 376–377. Pp. 1885–1891.
3. *Грядунов К.И., Козлов А.Н., Немчиков М.Л., Мельникова И.С.* Диагностирование авиационных двигателей по содержанию металлов в масле // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 3. С. 35–44.

4. Шапорова Е.А., Стойко С.О. Техническая диагностика авиационных двигателей // Авиация: история, современность, перспективы развития: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАА, 2020.
5. Wang X., Sun H., Wang S., Huang W. Cross-Correlation Algorithm-Based Optimization of Aliasing Signals for Inductive Debris Sensors // *Sensors*. 2020. V. 20. Pp. 5949.
6. Cassidy K. Qualification of an On-Line Bearing and Gear Health Monitoring Technique for In-Service Monitoring of Aircraft Engines and Helicopter Transmissions. http://www.gastopsusa.com/knowledge_center_documents/1/MetalSCAN_ISHM07.pdf.
7. Harkemanne E., Berten O., Hendrick P. Analysis and Testing of Debris Monitoring Sensors for Aircraft Lubrication Systems // *Proceedings*. 2018. V. 2. P. 461.
8. Xiao H., Wang X., Li H., Luo J., Feng S. An Inductive Debris Sensor for a Large-Diameter Lubricating Oil Circuit Based on a High-Gradient Magnetic Field // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. Pp. 1546.
9. Wu S., Liu Z., Yuan H., Yu K., Gao Y., Liu L., Pan X. Multichannel Inductive Sensor Based on Phase Division Multiplexing for Wear Debris Detection // *Micromachines*. 2019. V. 10. Pp. 246.
10. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // *Sensors*. 2020. V. 20. Pp. 2107.
11. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Блинов А.В., Мухутдинов Ф.И. Особенности преобразования информации в системе контроля частиц износа пар трения на основе кластера одновитковых вихретоковых чувствительных элементов // *Турбины и дизели*. 2017. № 4 (73). С. 10–17.
12. Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Sekisov Yu. Monitoring the state of power plants' friction pairs on the basis of single-coil eddy-current sensors // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1891. Pp. 012053.
13. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Блинов А.В., Лучишева М.В., Мухутдинов Ф.И. Средства диагностики и оценки остаточного ресурса пар трения в процессе эксплуатации газотурбинных двигателей // *Автометрия*. 2021. № 6. С. 132–140.
14. Belopukhov V., Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Podlipnov P., Sazhenkov A., Sekisov Y. Monitoring metal wear particles of friction pairs in the oil systems of gas turbine power plants // *Energies*. 2022. V. 15. Pp. 4896.
15. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors. In *Sensors, Measurements and Networks, Book Series: Advances in Sensors*, Vol. 8 / ed. S. Y. Yurish. Barcelona: IFSA Publishing, S. L., 2022. 19–48 p.
16. Патент РФ 2668513 Способ обнаружения частиц металла в масле системы смазки узлов трения и определения скорости потока масла / Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н., Белослудцев В.А. Оpubл. 01.10.2018, бюл. 28.
17. Патент РФ 2674577 Способ обнаружения частиц металла в системе смазки узлов трения силовых установок с разбиением на группы по размерам частиц / Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Белослудцев В.А., Секисов Ю.Н. Оpubл. 11.12.2018, бюл. 35.
18. Патент РФ 2724309 Способ обнаружения и оценки размеров единичных частиц металла в системе смазки пар трения силовых установок / Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н. Оpubл. 26.06.2020, бюл. 18.
19. Патент РФ 2749574 Способ определения скорости потока масла при обнаружении частиц металла в средствах диагностики узлов трения ГТД / Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н. Оpubл. 15.06.2021, бюл. 17.
20. Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // *Sensors*. 2023. V. 23. Pp. 351.
21. Парселл Э. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. 416 с.
22. Галласер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.
23. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
24. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
25. Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / под общ. ред. Скобелева О.П. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 224 с.
26. Методы и средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах в проточной части ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик / Под общ. ред. О.П. Скобелева. Самара: Новая техника, 2021. 142 с.

27. Модуль Е-440. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ЗАО «Л-Кард», 2003. 91 с.
28. *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E.* Study of Algorithms for Stabilizing the Constant Component of the Output Signal of the Measuring Circuit with a Single-coil Eddy Current Sensitive Element in the Systems for Debris Monitoring of Friction Pairs of Power Plants // 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2022. Pp. 1–7.

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2023 г.

AMBIENT TEMPERATURE IMPACT ON THE PARAMETERS OF THE ELECTRICAL CIRCUIT OF SENSING ELEMENT IN CLUSTER EDDY CURRENT SENSOR OF METAL CHIPS IN THE LUBRICATION SYSTEMS OF GAS TURBINE ENGINES

V.A. Belosludtsev, S.Y. Borovik, I.G. Korshikov, Y.N. Sekisov*

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

E-mail: borovik@iccs.ru, kig770@mail.ru, sekisov@iccs.ru

Abstract. *The detection of the wear particles in the engines' lubrication systems is one of the most effective ways to assess the state of the bearing assemblies of machines and mechanisms. The most promising existing systems for online monitoring of wear particles are based on the eddy current methods for monitored parameters conversion. The reason is that such systems have the ability not only to determine the particle size, but also to recognize its magnetic properties, which makes it possible (under certain conditions) to localize the place of the defect development. At the same time, it is known that the ambient temperature changes in the monitored zone are one of the main external factors that have a significant impact on the informative parameters of eddy current converters. This is of particular importance for debris monitoring systems in high-power plants' lubrication systems (e.g. gas turbine engine), where the oil temperature can vary widely (-50...+160 °C). The temperature impact on the parameters of the electrical circuit of sensing element in the cluster single-coil eddy current sensor of metal chips, which is a part of the debris continuous monitoring system prototype for high-thrust aviation gas turbine engine, is studied in the article. A typical design of the single-coil sensing element is considered. The study results of the temperature effect on the sensing element inductance, as well as on the parameters of the current lead that connects the sensing element to the matching transformer and to the measuring circuit are presented. Methods for reducing the impact of temperature changes in the monitored area on the parameters of the electrical circuit of the sensing element are proposed, too.*

Keywords: *gas turbine engine, bearing, wear, metal chip, lubrication system, monitoring, cluster eddy current sensor, sensing element, ambient temperature influence, impact reducing methods.*

REFERENCES

1. Miller J., Kitaljevich D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment // IEEE Aerosp. Conf. Proc. 2009. V. 6. Pp. 49–56.
2. Peng Y., Wu T., Wang S., Peng Z. Wear state identification using dynamic features of wear debris for on-line purpose // Wear. 2017. V. 376–377. Pp.1885–1891.
3. Gryadunov K.I., Kozlov A.N., Nemchikov M.L., Melnikova I.S. Diagnostirovanie aviacionnyh dvigatelej po sodержaniyu metallov v masle [Diagnostics of aircraft engines by the content of metals in oil] // Nauchnyi Vestnik MGTU GA. 2019. V. 22. № 3. Pp. 35–44. (In Russian)
4. Shaporova E.A., Stojko S.O. Tekhnicheskaya diagnostika aviacionnyh dvigatelej [Technical diagnostics of aircraft engines] // Aviation: history, modernity, development prospects: Proc. V Intern. Scien.-techn. conf. Minsk: BGAA. 2020. (In Russian)



© The Author(s), 2023

* Viktor A. Belosludtsev, Leading Designer.

Sergey Y. Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Scientist.

Igor G. Korshikov, Junior Scientist.

Yuriy N. Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Chief Scientist.

5. Wang X., Sun H., Wang S., Huang W. Cross-Correlation Algorithm-Based Optimization of Aliasing Signals for Inductive Debris Sensors // *Sensors*. 2020. V. 20. Pp. 5949.
6. Cassidy K. Qualification of an On-Line Bearing and Gear Health Monitoring Technique for In-Service Monitoring of Aircraft Engines and Helicopter Transmissions. http://www.gastopsusa.com/knowledge_center_documents/1/MetalSCAN_ISHM07.pdf.
7. Harkemanne E., Berten O., Hendrick P. Analysis and Testing of Debris Monitoring Sensors for Aircraft Lubrication Systems // *Proceedings*. 2018. V. 2. Pp. 461.
8. Xiao H., Wang X., Li H., Luo J., Feng S. An Inductive Debris Sensor for a Large-Diameter Lubricating Oil Circuit Based on a High-Gradient Magnetic Field // *Appl. Sci*. 2019. V. 9. Pp. 1546.
9. Wu S., Liu Z., Yuan H., Yu K., Gao Y., Liu L., Pan X. Multichannel Inductive Sensor Based on Phase Division Multiplexing for Wear Debris Detection // *Micromachines*. 2019. V. 10. Pp. 246.
10. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // *Sensors*. 2020. V. 20. Pp. 2107.
11. Borovik S.Yu., Sekisov Yu.N., Blinov A.V., Muhutdinov F.I. Osobennosti preobrazovaniya informatsii v sisteme kontrolya chastic iznosa par treniya na osnove klastera obnovitkovykh vihtokovykh chuvstvitel'nykh elementov [Transformation of the information in the monitoring system of wear-and-tear particles of friction pairs on the basis of the group of single-coil eddy-current sensitive elements] // *Turbiny i Dieseli*. 2017. V. 73. № 4. Pp. 10–17. (In Russian)
12. Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Sekisov Yu. Monitoring the state of power plants' friction pairs on the basis of single-coil eddy-current sensors // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1891. Pp. 012053.
13. Borovik S.Y., Sekisov Y.N., Blinov A.V., Luchsheva M.V., Mukhutdinov F.I. Tools for diagnostics and assessment of remaining lifetime of friction units at operation of gas turbine engines // *Optoelectron. Instrument. Proc*. 2021. V. 57. Pp. 675–682.
14. Belopukhov V., Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Podlipnov P., Sazhenkov A., Sekisov Y. Monitoring metal wear particles of friction pairs in the oil systems of gas turbine power plants // *Energies*. 2022. V. 15. Pp. 4896.
15. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors. In *Sensors, Measurements and Networks, Book Series: Advances in Sensors, Vol. 8* / ed. S. Y. Yurish. Barcelona: IFSA Publishing, S. L., 2022. 19–48 p.
16. Patent RF No. 2668513 Metal particles detection in the friction units lubrication system oil and the oil flow speed determining method / Borovik S.Y., Korshikov I.G., Sekisov Y.N., Belosludtsev V.A., 2018. Byull. Izobret. No. 28.
17. Patent RF No. 2674577 Method of detection of particles of metal in system for lubrication of friction nodes of power installations divided into groups by particles sizes / Borovik S.Y., Korshikov I.G., Belosludtsev V.A., Sekisov Y.N., 2018. Byull. Izobret. No. 35.
18. Patent RF No. 2724309 Method for detecting and evaluating the size of single metal particles in the system for lubricating friction pairs in power plants / Belopukhiv V.N., Borovik S.Y., Korshikov I.G., Sekisov Y.N., 2020. Byull. Izobret. No. 18.
19. Patent RF No. 2749574 Method for oil flow rate detection during the metal particles monitoring by the friction pairs' diagnostics tools of GTE / Borovik S.Y., Korshikov I.G., Sekisov Y.N., 2021. Byull. Izobret. No. 17.
20. Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // *Sensors*. 2023. V. 23. Pp. 351.
21. Parsell E. Electricity and magnetism. Moscow: Nauka, 1983. 416 p.
22. Gallager R. Finite element method. Basics. Moscow: Mir, 1984. 428 p.
23. Methods and Tools for Measuring Multidimensional Displacements of Structural Components of Power Plants / Sekisov Y.N., Skobelev O.P., Eds. Samara: Izd. SamNTs RAN, 2001, 188 pp. (In Russian).
24. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. Inductance calculation: Reference book. – Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 488 p.
25. Cluster Methods and Tools for Measuring Radial Clearances in Turbine Flow Section / Skobelev O.P., Ed., Moscow: Izd. Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2018, 224 pp. (In Russian).
26. Methods and Tools for the Processing of the Information About Radial Clearances in GTE Flow Section with Self-Compensation of Temperature Effect on the Sensor / Skobelev O.P., Ed., Samara: Izd. Novaya Tekhnika, 2021, 142 pp. (In Russian).
27. Module E-440. Technical Specification and User's Guideline. – Moscow: ZAO L-Kard, 2003. 91 p.

28. *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E.* Study of Algorithms for Stabilizing the Constant Component of the Output Signal of the Measuring Circuit with a Single-coil Eddy Current Sensitive Element in the Systems for Debris Monitoring of Friction Pairs of Power Plants // 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2022. Pp. 1–7.

Original article submitted 17.04.2023

УДК 621.9.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ С ВЕРТИКАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМ РОТОРОМ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯГА

Э.С. Гаспаров, Г.А. Маркосян, О.Ю. Казакова*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ericgasparov@rambler.ru, Emgeemge@mail.ru, kazakova8080@mail.ru

Аннотация. Исследуется возможность применения способа определения усилия предварительного натяга для радиально-упорных подшипников, используемых в опорах шпиндельных узлов для высокоскоростного фрезерования. Ранее был разработан и апробирован способ определения усилия предварительного натяга подшипниковых опор на высокоскоростных шлифовальных электрошпинделях с горизонтальным расположением шпинделя.

Объектом исследования стала специально сконструированная опора с радиально-упорными подшипниками 7004 ACD_P4A SKF и вертикальным расположением ротора. Была разработана информационно-измерительная система. Данная система состоит из датчиков виброускорения PCB 352C34, датчика силы Vishay 614, контроллера NI-cRIO-9056, модулей NI 9250, NI 9237 и NI 9481 и программного обеспечения, написанного на языке Labview фирмы National Instruments. Была улучшена система тестовых воздействий за счет ее автоматизации. Тестовые воздействия стали осуществляться с помощью соленоида с сердечником, который управлялся контроллером NI и разработанным программным обеспечением. За счет этого была сформирована одинаковая временная задержка между тестовым воздействием и началом записи сигнала виброускорения.

Для всего диапазона предварительного натяга были получены сигналы виброускорений. Чтобы исследовать контролеспособность узла, использовались два датчика виброускорений: с параллельным и перпендикулярным расположением осей направления вибрации и тестового воздействия. Для первой и второй группы виброускорений были осуществлены спектральные преобразования и получены амплитудно-частотные характеристики узла для всего диапазона значений предварительного натяга.

В результате сделан вывод, что представленная методика и критерии применимы для шпиндельных узлов высокоскоростного фрезерования с вертикальным расположением ротора. Также показано, что данная методика может быть автоматизирована.



© Автор(ы), 2023

*Эрик Сергеевич Гаспаров, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электронные системы и информационная безопасность".

Геворг Арменович Маркосян, аспирант кафедры "Информационно-измерительная техника".

Ольга Юрьевна Казакова, кандидат технических наук, доцент кафедры "Технология машиностроения, станки и инструменты".

Ключевые слова: ротор, обработка, станок, фрезерование, электрошпиндель, натяг, подшипники, усилие, стенд, оснастка, виброускорение, импульс, акселерометр, методика.

Введение

Высокоскоростная обработка – это методология обработки, которая фокусируется на чрезвычайно быстрых, но легких режимах резания с низким давлением. Результатом является общее увеличение скорости удаления материала. Важным фактором в оценке процесса высокоскоростной механической обработки (HSM-обработки) и в частности фрезерования (HSC) является производительность станков, что определяет стоимость производства и повышение качественных характеристик процесса обработки. При этом должно обеспечиваться динамическое качество ШУ станка для сохранения износостойкости инструмента и его ресурса, а также обеспечения точности обработки [1, 2].

В станках высокоскоростного фрезерования используют электрошпиндели. Их применение обусловлено высокими скоростями вращения шпинделя с электрическим приводом [3–5]. Шпиндель в таких узлах представляет собой короткое массивное тело, поэтому его можно считать абсолютно жестким валом на упругих опорах. В опорах используют подшипники качения, а именно радиально упорные шарикоподшипники, которые обеспечивают необходимые жесткостные характеристики при высоких скоростях вращения [6, 7, 8–10]. Характеристики опор качения, такие как рабочая температура опоры, жесткость, поперечные и продольные отклонения шпинделя узла в целом, виброактивность, во многом зависят от правильно подобранного значения предварительного натяга.

В настоящей статье проверяется применимость методики определения усилия предварительного натяга для более габаритных шарикоподшипниковых узлов, применяемых во фрезерных электрошпинделях при вертикальном расположении шпинделя.

Для этих целей был разработан экспериментальный стенд.

Описание экспериментального стенда

Общая схема экспериментального стенда показана на рис. 1. Объектом исследования является подшипниковый узел, надежно прикрепленный болтовым соединением к оснастке.

Оснастка представляет собой телескопическую конструкцию, благодаря этому возможно обеспечить регулировку высоты подшипникового узла. Оснастка шестью болтами жестко закреплена к массивной стальной плите.

Подшипниковый узел состоит из двух одиночных радиально-упорных подшипников 7004 ACD P4A [11, 12]. Подшипники установлены по схеме «О», между внутренними обоймами на валу установлена дистанционная втулка, внутренней обоймой передний подшипник упирается в бурт вала, сзади болтом и шайбой пакет элементов фиксируется на валу. Передний подшипник наружной обоймой упирается в крышку, а задняя опора – плавающая (рис. 2).

Стенд сконструирован таким образом, чтобы предварительный натяг в подшипниковом узле создавался за счет хода штока пневмоцилиндра. К штоку жестко прикреплен тензодатчик (для измерения и контроля силы предварительного натяга) с промежуточным валом. Шар из высокопрочной стали запрессован с противоположной стороны промежуточного вала и через чашевидную втулку равномерно передает усилие от пневмоцилиндра на наружную обойму заднего подшипника. Пневмоцилиндр установлен на вертикальном держателе, который

жестко закреплен на массивной плите. На гильзе подшипникового узла отфрезерованы лыски параллельно и перпендикулярно к плоскости установочной плиты. На лысках над наружными обоймами подшипников нарезаны резьбы под установочные места акселерометров (см. рис. 2).

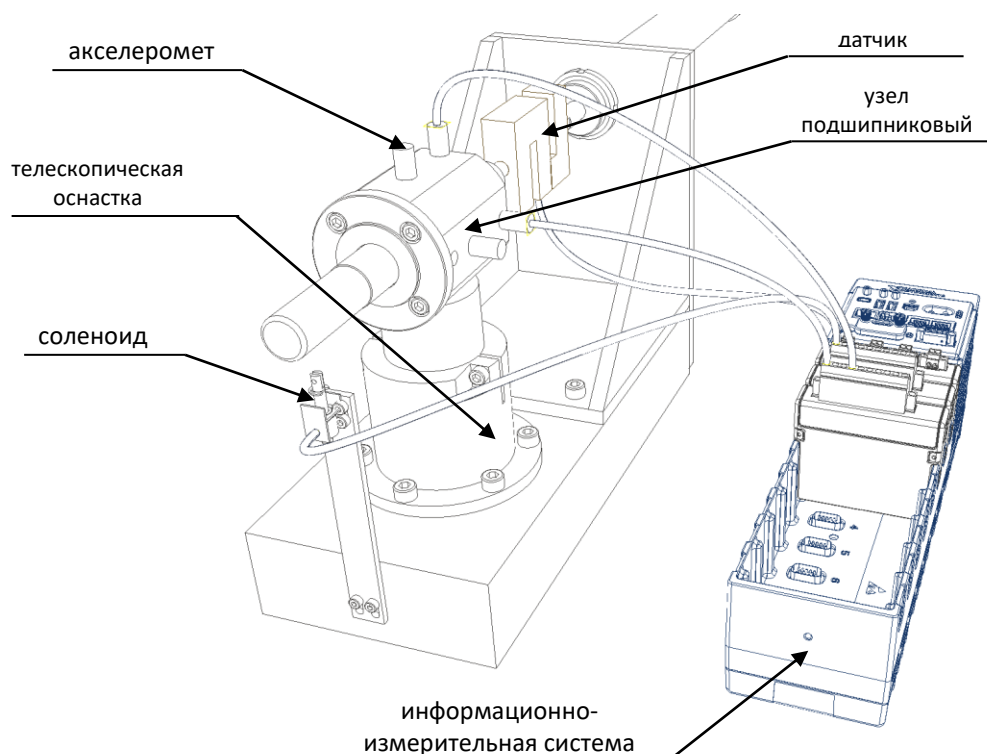


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

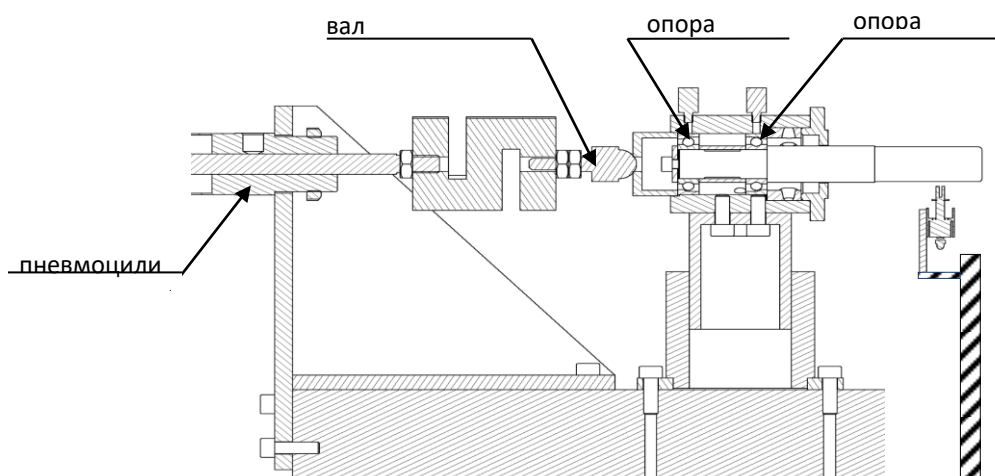


Рис. 2. Экспериментальный стенд в разрезе

Производителем радиально-упорных подшипников 7004 ACD_P4A является компания SKF [11, 12]. Данные о значениях величины предварительного натяга взяты из официальной документации подшипников. При частоте вращения до 38000 об/мин предварительный натяг подшипника лежит в диапазоне от 50 Н до 400 Н.

Отдельно от приспособления крепления подшипникового узла, на штативе с плечом установлен соленоид, с помощью которого формируется кратковременное ударное воздействие на вал в области передней опоры и возбуждается вибрация.

Информационно-измерительная система

Система предназначена для съема и записи информации от акселерометров, тензодатчика, а также для управления соленоидом. Информационно-измерительная система состоит из датчиков виброускорения PCB 352C34, датчика силы Vishay 614, контроллера NI-cRIO-9056, модулей NI 9250, NI 9237 и NI 9481 и программного обеспечения, написанного на языке Labview фирмы National Instruments [13].

Использовался датчик виброускорения PCB 352C34 со встроенной электроникой стандарта ICP. Акселерометр подключался к модулю NI 9234. В табл. 1 приведены характеристики акселерометра PCB 352C34.

Таблица 1

Характеристики акселерометра

Наименование	Размерность	PCB 352C34
Осевая чувствительность ($\pm 10\%$)	мВ/г ^{*1}	100
Амплитудный диапазон	г ^{*1}	± 50
Частотный диапазон ($\pm 5\%$)	Гц	0,5–10000
Частотный диапазон ($\pm 10\%$)	Гц	0,3–15000
Разрешение	м/с ²	0,0015
Резонансная частота	кГц	≥ 50
Нелинейность	%	≤ 1
Поперечная чувствительность	%	≤ 5
Температурный диапазон	°C	-54 до +93
Чувствительность к деформации крепления	(м/с ²)/ $\mu\epsilon$	0,0029
Спектральный шум (100 Гц)	($\mu\text{м/с}^2$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$	33
Спектральный шум (1000 Гц)	($\mu\text{м/с}^2$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$	14
Чувствительный элемент	–	Керамика
Нагрузка чувствительного элемента	–	Сдвиговая
Материал корпуса	–	Титан
Размер	мм	11,2×22,4
Масса	грамм	5,8
Разъем	–	10-32 Coaxial Jack
Государственный реестр СИ	–	№ 76059-19

Датчик силы Vishay 614 установлен между штоком пневмоцилиндра и чаше-видной втулкой, является тензодатчиком, собранным по полномостовой схеме, выход которого подсоединяется к одному из каналов модуля NI 9237. Характеристики используемого датчика силы Vishay 614 приведены в табл. 2.

Характеристики датчика

Наибольший предел измерения, Н	500	Рабочий диапазон температур, °C	-10...+40
Рабочий коэффициент передачи, Мв/В	2	Предельно допустимая нагрузка, %	150
Класс точности, ±Мв/В	0,2	Решающая нагрузка, %	300
Ползучесть за 30 мин, %	0,05	Рекомендуемое напряжение питания, В	10
Баланс нуля, ±Мв/В	0,02	Макс. напряжение питания, В	15
Температурный дрейф нуля, %/°C	0,01	Класс защиты	IP67
Входное сопротивление, Ом	415±15	Материал	Нержавеющая сталь
Выходное сопротивление, Ом	350±3	Длина кабеля, м	1

Сигнальная панель NI 9250 представляет собой модуль аналогового ввода с предварительной фильтрацией для интеллектуального подключения пьезоэлектрических датчиков (IEPE), а также сигналов постоянного и переменного тока, с частотой дискретизации до 51,2 кГц. Для оцифровки аналогового сигнала использовался 24-битный дельта-сигма АЦП. Схема входной цепи модуля NI 9250 приведена на рис. 3.

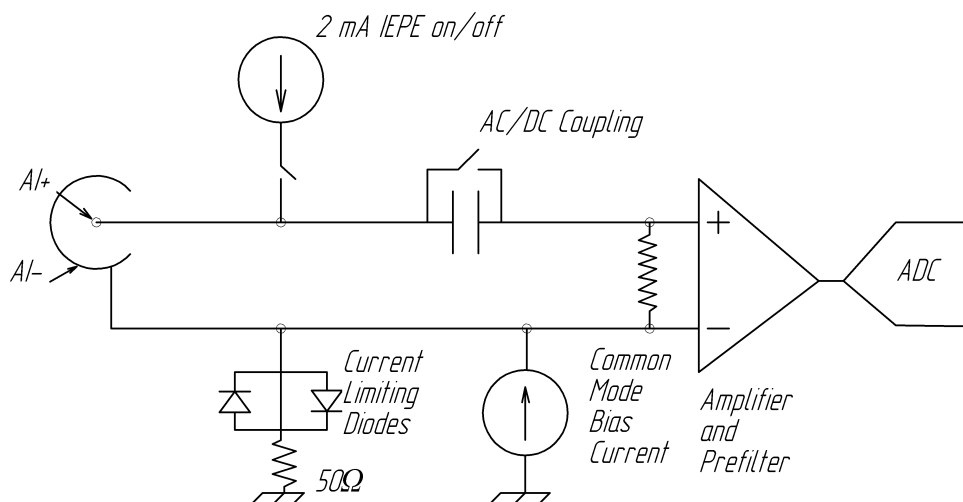
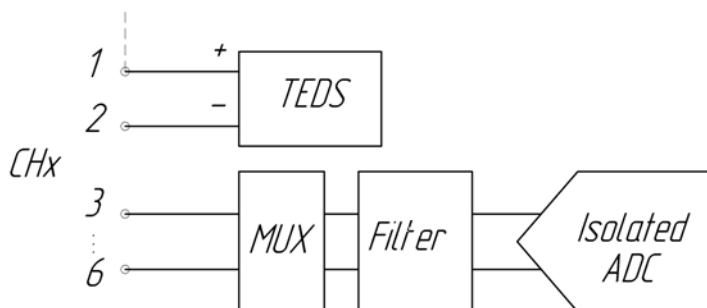
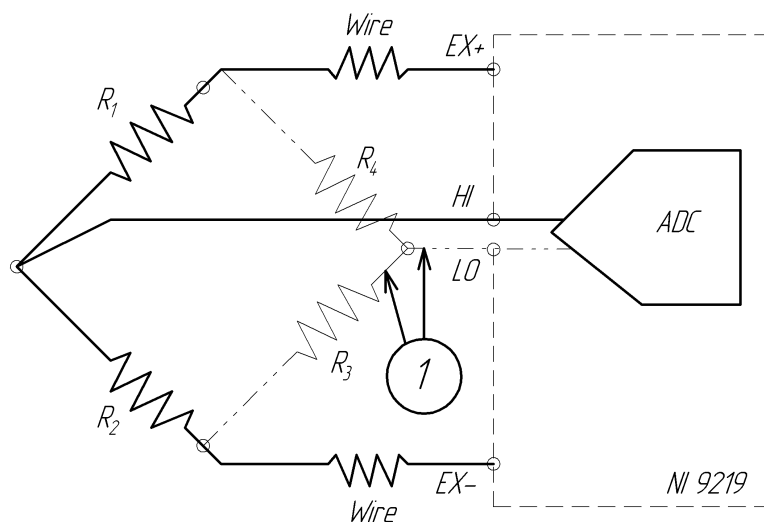


Рис. 3. Входная цепь NI 9250 для одного канала

Панель NI 9237 представляет собой модуль с межканальной изоляцией. Модуль позволяет одновременно оцифровывать четыре входных аналоговых канала с помощью 24-разрядных АЦП. Схема возбуждения применялась во всех входных режимах, в которых необходимо возбуждение. АЦП совместно со схемами возбуждения реконфигурировались во всех режимах для согласования с каждым типом датчика. На рис. 4, а представлена входная цепь для одного канала NI 9237, а на рис. 4, б – схема подключения датчиков в полу- и полномостовой схеме.



a



б

Рис. 4. Входная цепь для одного канала NI 9237 и схема подключения датчиков: *a* – входная цепь одного канала NI 9237; *б* – схема подключения датчиков в полу- и полномостовом исполнении (пунктирной линией представлена часть цепи, подключаемая только в полномостовом режиме)

Методика проведения эксперимента

Строго перпендикулярно продольной оси подшипникового узла с помощью соленоида передавался кратковременный импульс. Программа управления соленоидом дает возможность контроля параметра длительности импульса возбуждения (15 мс), сигнал управления соленоидом формируется с помощью одного из

каналов дискретного модуля NI 9481. Расстояние соленоида от поверхности вала строго определенное, что обеспечивает одинаковую силу удара. Для восьми значений усилия предварительного натяга, Н: 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400 были проведены по три ударных воздействия одинаковой силы.

Полученные сигналы виброускорений записывались в виде файлов с расширением *.tdms в память ПЭВМ (рис. 5).

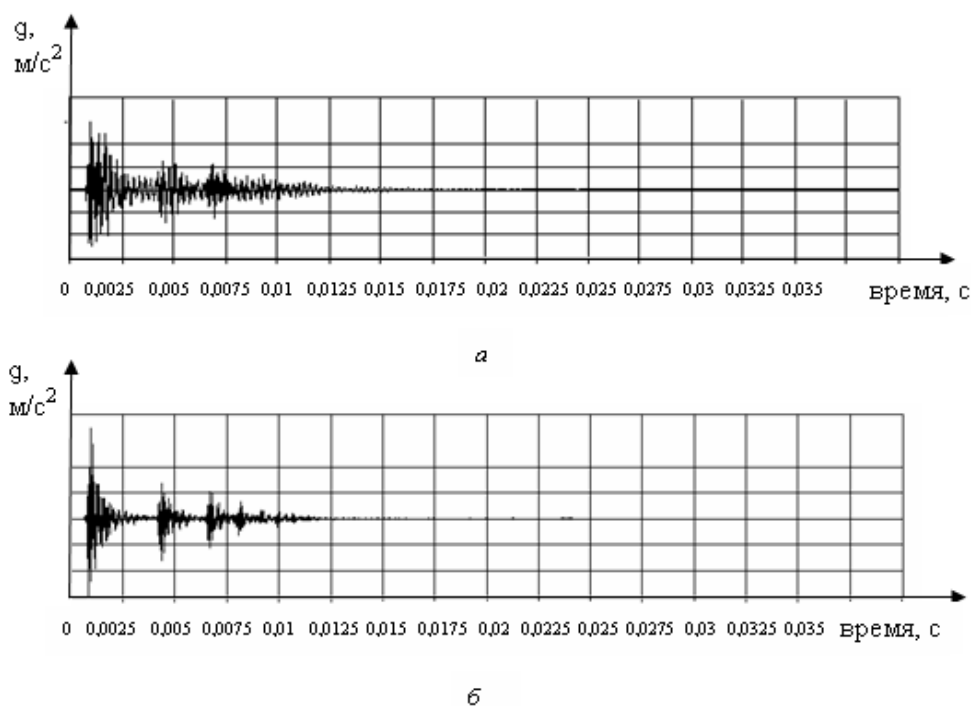


Рис. 5. Отклики виброускорения канала 0 и канала 1 при 150 Н: *а* – направления оси удара и оси акселерометра перпендикулярны; *б* – направления оси удара и оси акселерометра соосны

Для всех значений предварительного натяга были получены амплитудные спектры. Для значений преднатяга 20, 60, 150 Н на рис. 6, *а* приведены графики амплитудных спектров сигналов виброускорений нулевого канала, а на рис. 6, *б* – графики амплитудных спектров сигналов виброускорений первого канала.

Из визуального анализа графиков амплитудных спектров видно, что с увеличением усилия предварительного натяга происходит перетекание спектра в область более высоких частот. Особенно хорошо это видно на рис. 5 для сигналов нулевого канала. Таким образом, в качестве критерия оценки предварительного натяга можно использовать такую интегральную оценку, как абсцисса центра тяжести спектра сигнала виброускорения [14–17].

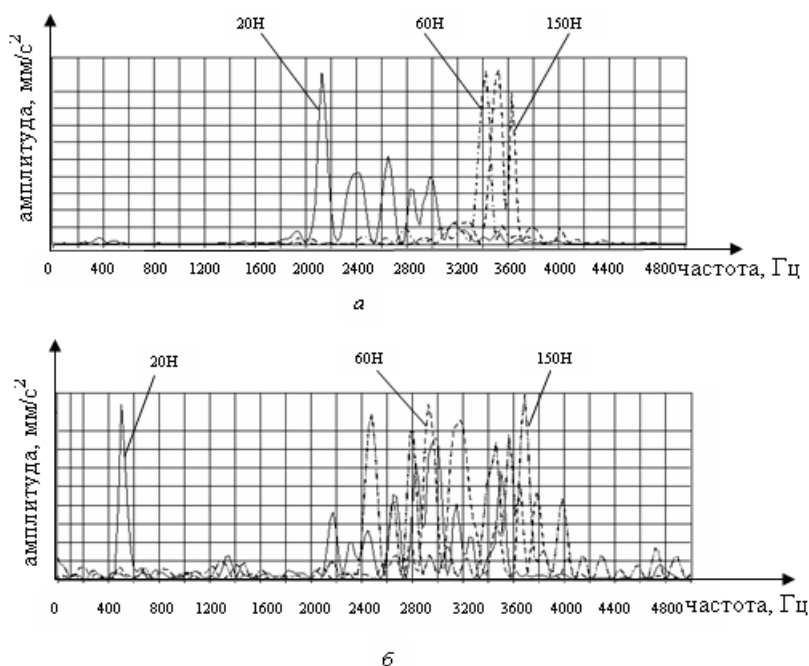


Рис. 6. Графики амплитудных спектров сигналов виброускорений:
 а – нулевого канала; б – первого канала

Заключение

Исходя из анализа можно сделать следующие заключения

1. Методику определения предварительного натяга [14–17] можно применять для подшипников, используемых в опорах шпиндельных узлов для высокоскоростного фрезерования.
2. Методику определения предварительного натяга [14–17] можно применять для узлов с вертикальным расположением шпинделя.
3. При вертикальном расположении шпинделя направление удара должно быть перпендикулярно оси акселерометра. При таком расположении сигнал отклика визуальнее более однозначно выражен на частотной оси. То есть при перпендикулярном расположении акселерометра и оси направления удара сигнал отклика менее зависит от силы удара и в нем отсутствуют ярко выраженные вторичные всплески.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сабиров Ф.С. Повышение эффективности станков на основе их диагностирования и определения виброустойчивости в рабочем пространстве: Дис. ... докт. техн. наук. М.: Мос. гос. технол. ун-т «СТАНКИН», 2009. 269 с.
2. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Суслов Д.Н., Абрамов А.П. Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки // СТИН. 2010. № 6. С. 17–21.
3. Пивкин П.М., Гречишников В.А., Ершов А.А. [и др.] Фундаментальные основы формирования микрорельефа поверхности дисковыми фрезами при высокоскоростном многокоординатном фрезеровании // СТИН. 2022. № S12–2. С. 21–24.

4. *Гречишников В.А., Пивкин П.М., Петухов Ю.Е. [и др.] Информационная система оценки уровня формализации процесса высокоскоростного многокоординатного фрезерования // СТИН. 2022. № S12–2. С. 25–28.*
5. *Фролов П.И., Семенов П.И. Высокоскоростное концевое фрезерование как метод механической обработки лопаток компрессора авиационного ГТД // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 101–103.*
6. *Кулак С.М. Вибродиагностика: учеб. пособие. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019.*
7. *Пивень В.В., Сызранцев В.Н., Челомбитко С.И. Вибрационная диагностика роторного оборудования: учеб. пособие. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021.*
8. *Сидоров В.А., Цокур В.П. Возможности виброметрии при техническом обслуживании станков с ЧПУ // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2021. № 2(73). С. 91–99.*
9. *Денисенко А.Ф., Михайлов В.В. Определение вибрационной мощности источников колебаний шпиндельных узлов металлорежущих станков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 3(101). С. 55–61.*
10. *Зими́на Л.А., Попов А.Н. Ультразвуковая диагностики вращающегося оборудования на промышленном предприятии // Интеллектуальная энергетика: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Барнаул: Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов, 2022. С. 268–270.*
11. *Девирной С. Прецизионные подшипники SKF для станкостроения // Станкоинструмент. 2017. № 1(6). С. 64–65.*
12. *Сафонов И., Банников А. Восстановительный ремонт шпиндельных узлов в компании SKF // Станкоинструмент. 2019. № 1(14). С. 82–84.*
13. *Рияд А., Молчанов А.А. Программирование LabView для анализа вибрации шпинделя станка с ЧПУ // Инновационные научные исследования. 2021. № 2–3(4). С. 6–16.*
14. *Гаспаров Э.С., Гаспарова Л.Б., Маркосян Г.А. Исследование виброактивности электрошпинделей шлифовальных станков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 6(103). С. 23–29.*
15. *Gasparov E.S., Gasparova L.B. Mathematical Model of Spindle Unit Bearing Assembly // Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME): Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 725-731.*
16. *Гаспаров Э.С., Гаспарова Л.Б. Описание механизма образования сигнала вибрации в подшипниковой опоре с привязкой его к параметрам технического состояния шпиндельного узла // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. С. 48–50.*
17. *Гаспаров Э.С., Петрунин В.И. Определение рациональных частот вращения роторов с целью минимизации их радиальных биений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 1(57). С. 61–67.*

Статья поступила в редакцию 03 марта 2023 г.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE NATURAL FREQUENCIES OF A ROTOR SYSTEM WITH A VERTICALLY POSITIONED ROTOR ON THE PRELOAD

E.S. Gasparov, G.A. Marcossyan, O.Yu. Kazakova *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: ericgasparov@rambler.ru, Emgeemge@mail.ru, kazakova8080@mail.ru

Abstract. *The article discusses the possibility of using a method for determining the preload force for thrust and radial bearings of spindle assemblies for high-speed milling. Previously, a method was developed and tested for determining the preload force of bearing supports on high-speed grinding electrospindles with a horizontal spindle.*

The object of study is a support with angular contact bearings 7004 ACD_P4A SKF and a vertical rotor. An information-measuring system has been developed, which consists of PCB 352C34 vibration acceleration sensors, a Vishay 614 force sensor, an NI-cRIO-9056 controller, NI 9250, NI 9237 and NI 9481 modules, and software written in the National Instruments Labview language.

The system of test actions has been improved due to its automation. Test effects began to be carried out using a solenoid with a core, which was controlled by an NI controller and developed software. Due to this, the same time delay was formed between the test action and the start of recording the vibration acceleration signal.

Vibration acceleration signals are obtained for the entire preload range. To study the controllability of the unit, two vibration acceleration sensors were used: with a parallel and perpendicular arrangement of the axes of the direction of vibration and test action. For the first and second groups of vibration accelerations, spectral transformations were carried out, and the amplitude-frequency characteristics of the assembly were obtained for the entire range of preload values.

As a result of the work, it was concluded that the presented methodology and criteria are applicable to high-speed milling spindle assemblies with a vertical rotor. It is also shown that this technique can be automated.

Keywords: *rotor, machining, machine tool, milling, electrospindle, tightness, bearings, force, stand, equipment, vibration acceleration, impulse, accelerometer, technique.*

REFERENCES

1. *Sabirov F.S. Povysheniye effektivnosti stankov na osnove ikh diagnostirovaniya i opredeleniya vibroustoychivosti v rabochem prostranstve [Improving the efficiency of machine tools based on their diagnosis and determination of vibration resistance in the workspace]: Diss., dokt. tekhn. nauk: M.: Mos. gos. tekhnolun-t «Stankin», 2009. 269 p. (in Russian)*
2. *Kozochkin M.II., Sabirov F.S., Suslov D.N., Abramov A.P. Vibroakusticheskaya diagnostika opor shpindelej stankov dlya vysokoskorostnoj obrabotki [Vibroacoustic diagnostics of machine tool spindle supports for high-speed machining] // STIN. 2010, no 6. Pp. 17–21. (in Russian)*
3. *Pivkin P.M., Grechishnikov V.A., Yershov A.A. Fundamental'nye osnovy formirovaniya mikrorelyufa poverkhnosti diskovymi frezami pri vysokoskorostnom mnogokoordinatnom frezerovanii [Fundamental principles of surface microrelief formation by disk cutters in high-speed multi-axis milling] // STIN. 2022, no S12–2. Pp. 21–24. (In Russian)*



© The Author(s), 2023

* Erik S. Gasparov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Gevorg A. Markosyan, Postgraduate Student.

Olga Yu. Kazakova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

4. Grechishnikov V.A., Pivkin P.M., Petukhov Yu.Ye. Informatsionnaya Sistema otsenki urovnya formalizatsii prozessa vysokoskorostnogo mnogokoordinatnogo frezovaniya [Information system for assessing the level of formalization of the process of high-speed multi-axis milling] // STIN. 2022, no S12–2. Pp. 25–28. (In Russian)
5. Frolov P.I., Semenov P.I. High-speed end milling as a method of machining the compressor blades of an aircraft gas turbine engine // Electrophysical processing methods in modern industry: Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. Per'm': Permskiy natsional'nyi issledovatel'skiy politehnicheskii universitet, 2021. Pp. 101–103. (In Russian)
6. Kulak S.M. Vibrodiagnostika [Vibration-based diagnostics]: Tyumen: Tyumenskiy industrialniy universitet, 2019. (In Russian)
7. Piven' V.V., Syzranzev V.N., Chelombitko S.I. Vibratsionnaya diagnostika rotornogo oborudovaniya [Vibration diagnostics of rotary equipment]. Tyumen: Tyumenskiy industrialniy universitet, 2021. (In Russian)
8. Sidorov V.A., Tsokur V.P. Vozmozhnosti vibrometrii pri tekhnicheskoy obsluzhivani stankov s CHPU [Possibilities of vibrometry in the maintenance of CNC machines] // Progressivnyye tekhnologii machinostroyeniya. 2021, no 2(73). Pp. 91–99. (in Russian)
9. Dennisenko A.F., Mikhaylov V.V. Opredelenie vibratsionnoy moshchnosti istochnikov kolebaniy shpindel'nykh uzlov metallovezhushchih stankov [Determination of vibration power of vibration sources of spindle assemblies of metal-cutting machine tools] // Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra rossiyoskoy akademii nauk. 2021. Vol. 23, no 3(101). Pp. 55–61. (in Russian)
10. Zimina L.A., Popov A.N. Ul'trazvukovaya diagnostika vrashchayushchegosya oborudovaniya na promyshlennom predpriyatii [Ultrasonic diagnostics of rotating equipment in an industrial plant] // Intellektual'naya energetika: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Barnaul: Mezhhregional'nyy tsentr elektronnykh obrazovatel'nykh resursov, 2022. Pp. 268–270. (in Russian)
11. Dvirnoy S. Precizionnye podshipniki SKF dlya stankostroeniya [SKF precision bearings for the machine tool industry] // Stankoinstrument. 2017, no 1(6). Pp. 64–65. (In Russian)
12. Safonov I., Bannikov A. Vosstanovitel'nyy remont shpindel'nykh uzlov v kompanii SKF [Refurbishment of spindle assemblies at SKF] // Stankoinstrument. 2019, no 1(14). Pp. 82–84. (In Russian)
13. Riyad A., Molchanov A.A. Programmirovaniye LabView dlya analiza vibratsii shpindelya stanka s CHPU [LabView Programming for CNC Spindle Vibration Analysis] // Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya. 2021, no 2–3(4). Pp. 6–16. (In Russian)
14. Gasparov E.S., Gasparova L.B., Markosyan G.A. Issledovanie vibroaktivnosti elektroshpindel'nykh shlifoval'nykh stankov [Study of vibration activity of electrospindles of grinding machines] // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. № 6 (103). Pp. 23–29. (In Russian)
15. Gasparov E.S., Gasparova L.B. Mathematical Model of Spindle Unit Bearing Assembly // Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME): Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Cham: Springer International Publishing, 2020. Pp. 725–731.
16. Gasparov E.S., Gasparova L.B. Opisanie mekhanizma obrazovaniya signala vibratsii v podshipnikovoy opore s privyazkoj ego k parametram tekhnicheskogo sostoyaniya shpindel'nogo uzla [Description of the vibration signal formation mechanism in the bearing support with its binding to the parameters of the technical condition of the spindle assembly] // Vysokiyte tekhnologii v machinostroyenii: Materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Samara: Samarskiy gosudarstvenniy tekhnicheskii universitet, 2018. Pp. 48–50. (In Russian)
17. Gasparov E.S., Petrulin V.I. Opredelenie racional'nykh chastot vrashcheniya rotorov s cel'yu minimizatsii ih radial'nykh bienij [Determination of rational frequencies of rotation of rotors in order to minimize their radial beats] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2018, no. 1(57). Pp. 61–67. (In Russian)

Original article submitted 03.03.2023

Энергетика и электротехника

УДК 620.424.1

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС

*А.С. Ведерников, А.С. Шипилов, Е.А. Ярыгина**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vedernikovas@rambler.ru, alss.p@mail.ru, balukova_e@mail.ru

Аннотация. По правилам оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) электростанция является как производителем электроэнергии, так и ее потребителем, и обязана формировать прогноз электропотребления для формирования энергобаланса, а также несет финансовую ответственность за отклонение фактического потребления от поданного в прогнозе. В первой части статьи приводится анализ точности существующего метода прогнозирования электропотребления собственных нужд (СН) одной из действующих АЭС. Выполнен расчет различных оценок ошибки прогнозирования и показано, что применяемый метод в отдельные временные интервалы имеет недостаточную точность. Во второй части приводится анализ факторов, потенциально влияющих на электропотребление СН, оценивается качество регрессионной зависимости между данными факторами и электропотреблением и делается вывод об их значимости для разработки новой методики прогнозирования.

Ключевые слова: электрические станции, собственные нужды, прогнозирование, электропотребление.

Введение

Россия занимает второе место среди европейских стран по мощности атомной генерации и обладает полным спектром ядерных энергетических технологий. Доля атомной энергетики в общем объеме производства электроэнергии в 2020 году составила 20,6 %. В рамках повышения эффективности атомной энергетики и перехода на углеродно-нейтральную энергетику доля атомных



© Автор(ы), 2023

* Александр Сергеевич Ведерников, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрические станции».

Алексей Сергеевич Шипилов, аспирант кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Екатерина Александровна Ярыгина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции».

электростанций в установленной мощности генерации в Российской Федерации должна достигнуть 25 % к 2040-м годам. Следовательно, развитие атомной энергетики является актуальным вопросом в настоящее время [1].

Атомные электростанции, как и все генерирующие энергообъекты, являются как потребителями, так и производителями электрической энергии. Для эффективной поставки электроэнергии на оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) необходимо качественно планировать величину потребления мощности на собственные нужды (СН) электростанций. Потребление на СН определяется в соответствии с договором о присоединении к торговой системе оптового рынка как потребление электрической энергии, необходимое для функционирования в технологическом процессе выработки, преобразования и распределения электрической энергии [2].

Согласно методическим рекомендациям по несению нагрузки АЭС для обеспечения наибольшей экономической эффективности при реализации товарной продукции МР-ОПП.91.00.01 [3], при расчете экономического эффекта от работы на ОРЭМ необходимо учитывать следующее. Действующая модель ОРЭМ предусматривает максимальные штрафные санкции, минимальные цены продажи и максимальные цены покупки для субъектов оптового рынка, не исполняющих принятые на себя обязательства по несению режима производства-потребления электроэнергии. Таким образом, для системного оператора (СО) обеспечивается максимально точный прогноз работы генерирующих объектов энергосистемы.

В 2022 году от АЭС, действующей на территории России, была заявлена величина электропотребления СН 4,43 % от общей выработки. ФАС России ставит задачу снизить процент потребляемой активной мощности на СН по АЭС в 2022 году до величины 4,25 %. Следовательно, задача точного прогнозирования электропотребления системы СН АЭС считается актуальной.

Приобретение электроэнергии на СН станцией осуществляется при помощи двух рыночных механизмов: рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка (БР). При фактическом электропотреблении больше установленного максимального значения имеет место отрицательный экономический эффект, где электроэнергия реализована на БР по меньшей цене. При фактическом электропотреблении меньше установленного максимального значения также имеет место отрицательный экономический эффект от того, что пришлось совершать операцию по покупке электроэнергии по более высокой цене на БР. Следовательно, максимальный экономический эффект от реализации электроэнергии на РСВ и БР достигается при точном планировании потребления электроэнергии СН, то есть необходимо, чтобы максимальное значение потребляемой электроэнергии соответствовало фактическому значению [4].

В настоящее время максимально допустимая величина почасового расхода электроэнергии на собственные нужды генерации рассчитывается в соответствии с Методикой расчета потребления (расхода) электроэнергии на собственные и хозяйственные нужды и потерь при производстве и поставке электроэнергии АЭС на ОРЭМ. Расчет расхода электроэнергии на собственные нужды производится на стенде Ассоциация НП «Совет рынка».

На реальных данных действующей на территории России атомной электростанции были построены и проанализированы графики, отражающие фактическое и прогнозное значения электропотребления системой СН на основании имеющейся методики расчета (рис. 1–3).

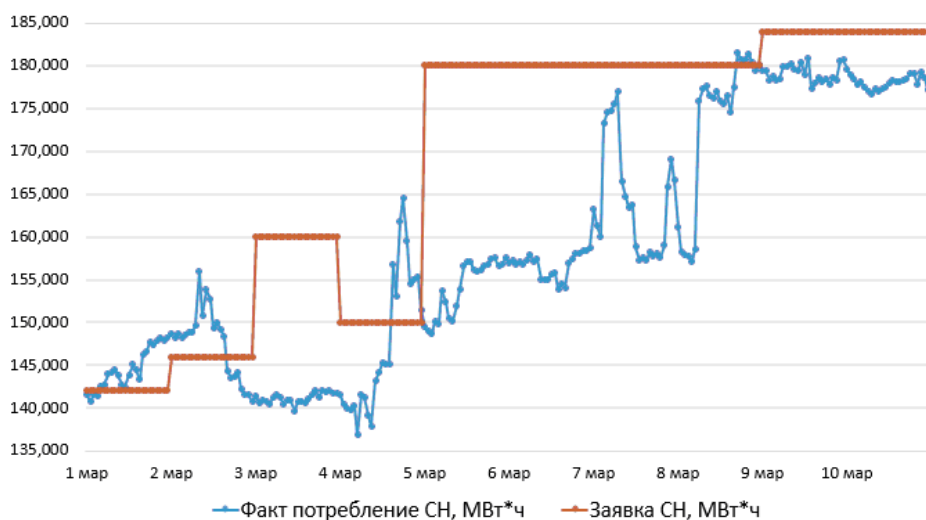


Рис. 1. Часть графика, отражающего фактические и прогнозные почасовые значения электропотребления системой СН АЭС за март 2018 года

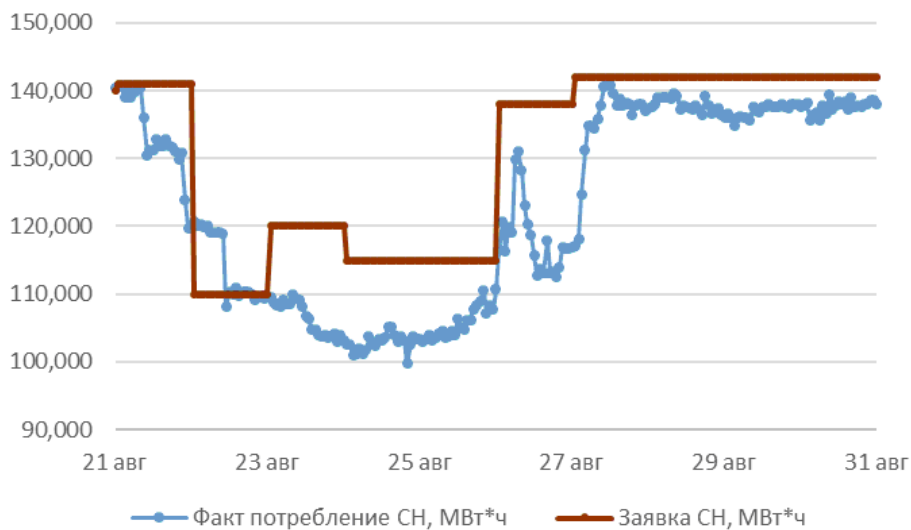


Рис. 2. Часть графика, отражающего фактические и прогнозные значения электропотребления системой СН АЭС за август 2021 года

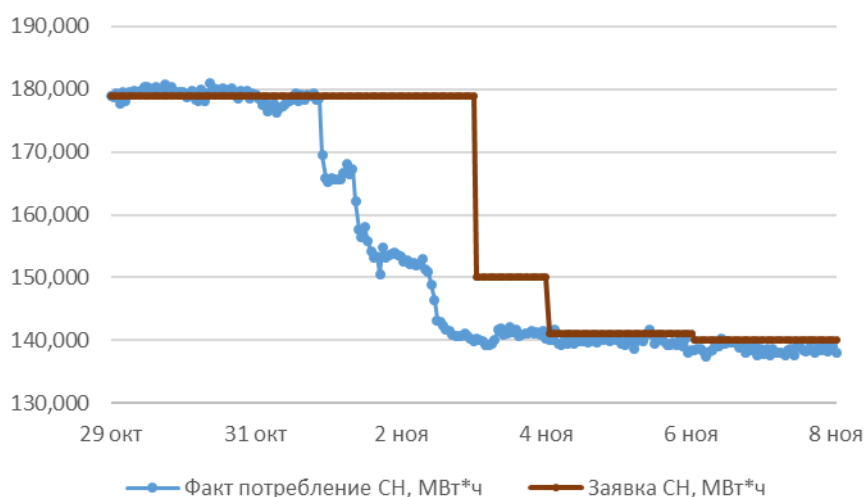


Рис. 3. Часть графика, отражающего фактические и прогнозные значения электропотребления системой СН АЭС за октябрь – ноябрь 2020 года

Из рис. 1–3 видно, что график прогнозных (подаваемых в заявке) значений имеет ступенчатый вид, что вызвано подачей одной и той же величины потребления на все часы суток. Таким образом, существующая методика не учитывает внутрисуточное изменение потребления.

Для определения ошибки прогнозирования электропотребления СН АЭС имеющимся методом необходимо проанализировать и определить подходящую ошибку прогнозирования, которую необходимо использовать в расчетах:

1. MPE – средняя процентная ошибка прогнозирования [5]. Недостаток ошибки в том, что в числовом ряду с большими выбросами любое незначительное колебание факта или прогноза может значительно поменять показатель ошибки и, как следствие, точности прогнозирования. Помимо этого, ошибка является несимметричной: одинаковые отклонения в плюс и в минус по-разному влияют на показатель ошибки. Средняя процентная ошибка рассчитывается по формуле

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i - \Pi_i}{\Phi_i},$$

где Φ_i – фактическое значение электропотребления; Π_i – прогнозное значение электропотребления.

Для рассмотренного интервала времени (см. рис. 1 – март 2018 года) $MPE = -0,064$.

2. MAPE – средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования [5]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Phi_i - \Pi_i}{\Phi_i} \right|.$$

Для рассмотренного интервала времени $MAPE = 0,075$.

3. WAPE — взвешенная абсолютная процентная ошибка прогнозирования [5]. Данная ошибка прогнозирования является симметричной и наименее чувствительна к искажениям числового ряда

$$WAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |\Phi_i - \Pi_i|}{\sum_{i=1}^n \Phi_i}.$$

Для рассмотренного интервала времени $WAPE = 0,073$.

4. RMSE — среднеквадратичная ошибка прогнозирования [5]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Pi_i)^2}.$$

Для рассмотренного интервала времени $RMSE = 14,683$.

Аналогичные расчеты для конца августа 2021 года (см. рис. 2) и конца октября – начала ноября 2020 г. (см. рис. 3) дают следующие значения ошибки:

Ошибка	21.08.2021 – 31.08.2021	29.10.2020 – 8.10.2020
MPE	-0,068	-0,047
MAPE	0,075	0,048
WAPE	0,070	0,046
RMSE	10,619	12,97

Таким образом, проанализированы и рассмотрены на реальных данных АЭС ошибки прогнозирования электропотребления СН.

Наиболее распространенной оценкой ошибки прогнозирования при составлении прогнозов потребления электроэнергии является MAPE. Ее величина имеет место при оценке временных рядов, реальные значения которых значительно больше 1. Данная оценка используется в технологии оперативного планирования режимов при расчетах планов балансирующего рынка [6]. Таким образом, MAPE является наиболее корректной оценкой рассматриваемых статистических данных.

За весь рассматриваемый период (2018–2021 гг.) $MAPE = 1,76 \%$, однако в отдельные временные промежутки (преимущественно в периоды вывода из работы и ввода в работу блоков станции) точность прогноза заметно снижается и ошибка достигает 5–20 %.

Таким образом, используемый в настоящее время метод прогнозирования имеет ограниченную точность и, следовательно, требует доработки.

Затраты электроэнергии на собственные нужды АЭС могут составлять до 14 % от вырабатываемой мощности [7], а для рассматриваемой станции составляют в среднем 4,5 %. Потребители СН каждого энергоблока АЭС условно разделяются на механизмы реакторного и турбинного отделений. В основном это различные насосы, составляющие от 70 до 90 % потребления СН.

К механизмам реакторного отделения относятся:

– главные циркуляционные насосы, прокачивающие воду через главный циркуляционный контур реактора (для рассматриваемой АЭС номинальная мощность составляет 38 % потребления СН – 128 МВт);

– подпиточные насосы, обеспечивающие подачу подпиточной воды в главный циркуляционный контур и поддержание заданного уровня и давления (3 %, 8,8 МВт).

Основными механизмами турбинного отделения являются:

– конденсатные насосы I и II ступени, перекачивающие конденсат из конденсатора турбины через блочную очистную установку в деаэратор (9 %, 32,2 МВт);

– питательные насосы, подающие химически очищенную и деаэрированную воду в парогенераторы (4 %, 14 МВт);

– сливные насосы, обеспечивающие слив конденсата из подогревателей в линию основного конденсата турбины (3 %, 10,8 МВт);

– насосы охлаждения, обеспечивающие водяное охлаждение генератора либо охлаждение газовой охлаждающей среды (для генераторов с воздушным и водородным охлаждением); сетевые насосы, обеспечивающие циркуляцию сетевой воды, когда станция используется для теплофикации (1 %, 5 МВт);

– насосы технической воды ответственных и неответственных потребителей (5 %, 15,6 МВт).

Как правило, вынесены за пределы энергоблока циркуляционные насосы блочных насосных станций, подающих в систему охлаждения второго контура воду из пруда-охладителя или градирни (23 %, 78 МВт).

В качестве привода ответственных механизмов собственных нужд энергоблоков тепловых электростанций используются в основном асинхронные двигатели высокого напряжения мощностью от 200 до 8000 кВт, частотой вращения 300–3000 об/мин [8].

Часть потребителей АЭС действуют периодически. Так, вспомогательные питательные насосы подают питательную воду в парогенераторы в режиме пуска и останова блока и при его обесточивании (2 %, 6,4 МВт). Некоторые потребители, такие как насосы аварийного расхолаживания, аварийного впрыска бора, спринклерные и пожарные насосы, включаются только в аварийных ситуациях.

Для качественного прогнозирования электропотребления необходимо выявить факторы, существенно влияющие на его величину, которые позже станут входными переменными математической модели.

Математическая модель прогноза потребления в общем виде представляет собой нелинейную функцию [6]

$$P_i = f(P_{i-n}, T_i, T_{i-n}, \varepsilon_i),$$

где P_i – потребление в рассматриваемый момент времени; P_{i-n} – ретроспективные данные потребления; T_i – прогнозные значения внешних факторов; T_{i-n} – ретроспективные значения внешних факторов; ε_i – случайная составляющая.

В качестве ретроспективных значений потребления СН взяты архивные данные АИИСКУЭ. Важной задачей является определение выборки из графика нагрузки, обеспечивающей баланс между качеством прогноза и скоростью его составления [8]. В задаче краткосрочного прогнозирования наиболее часто используются следующие типы выборки:

– учет одного или нескольких предыдущих почасовых значений;

– учет почасовых значений только текущих суток или текущих и N предшествующих;

– учет почасовых значений подобного дня (например, для прогноза на выходной день берутся значения того же дня предыдущей недели, для прогноза на праздничные дни – значения предыдущего года).

К внешним факторам T_i , способным повлиять на величину СН, относятся:

- генерация активной мощности $P_{\text{ген}}$;
- генерация реактивной мощности $Q_{\text{ген}}$;
- количество блоков в работе;
- погодные данные (в первую очередь температура атмосферного воздуха в регионе);
- сезонность (суточная, недельная, годовая).

Для всех перечисленных факторов имеются ретроспективные данные для генерации активной мощности, количества блоков и температуры; также доступны прогнозные значения (из планового диспетчерского графика, графика ремонтов и метеопрогноза соответственно).

Из перечисленных факторов в используемом в настоящее время методе используется плановая выработка активной мощности, а также сведения о планируемых пусках и остановах блоков и данные о потреблении электроэнергии при конкретных технологических процессах.

Для выявления связи между перечисленными факторами и величиной потребления СН были построены регрессионные зависимости и определено их качество.

Качество нелинейной регрессионной зависимости оценивается с помощью коэффициента детерминации [9]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ – сумма квадратов отклонений, обусловленная регрессией; $\sum (y_i - \bar{y})^2$ – общая сумма квадратов отклонений; y_i – фактическое значение потребления СН; $\hat{y}_i$ – прогнозное значение потребления СН; $\bar{y}$ – среднее значение y .

При этом значение $R^2 = 0$ означает полное отсутствие зависимости между переменными, $R^2 = 1$ означает наличие функциональной зависимости. Для того чтобы можно было утверждать зависимость потребления СН от рассматриваемого фактора, R^2 должен составлять не менее 0,5. Величина R^2 более 0,7 показывает наличие сильной корреляционной связи, т. е. значительного вклада данного фактора в изменение потребления.

Рассмотрим перечисленные факторы и определим наличие корреляции между ними и величиной потребления СН.

1. Генерация активной мощности $P_{\text{ген}}$. На рис. 4 изображена регрессионная зависимость между $P_{\text{ген}}$ и $P_{\text{сн}}$. Видно наличие прямой связи, обусловленной увеличением нагрузки на механизмы станции при увеличении выработки электроэнергии.

Регрессионная связь описывается следующим уравнением:

$$f = -0,0642x^2 + 43,9x - 1764,6,$$

где f – выработка электроэнергии; x – расход электроэнергии на СН.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.71$, что означает наличие значительной корреляции между рассматриваемыми величинами.

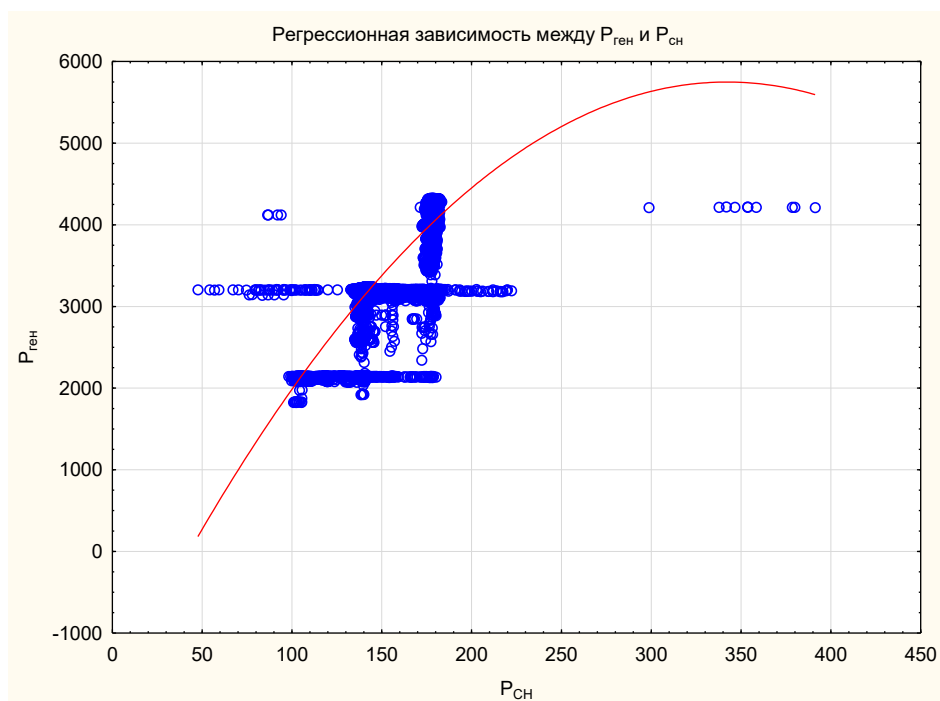


Рис. 4. Регрессионная зависимость между $P_{\text{ген}}$ и $P_{\text{сн}}$

2. Генерация реактивной мощности $Q_{\text{ген}}$. На рис. 5 изображена регрессионная зависимость между $Q_{\text{ген}}$ и $P_{\text{сн}}$.

Регрессионная связь описывается следующим уравнением:

$$f = -0,0052x^2 + 5,88x - 380,3,$$

где f – выработка реактивной мощности; x – расход электроэнергии на СН.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.26$, из чего следует отсутствие корреляции между генерацией реактивной мощности и потреблением на СН.

3. Количество блоков в работе. На рис. 6 изображена регрессионная зависимость между количеством блоков в работе N и $P_{\text{сн}}$. Состояние блоков (в работе / не в работе) учитывалось по положению генераторного выключателя.

Регрессионная связь описывается следующим уравнением:

$$f = -0,00006x^2 + 0,044x - 1,96,$$

где f – количество блоков электростанции; x – расход электроэнергии на СН.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.77$, что означает наличие корреляции между работой блоков и потреблением на СН.

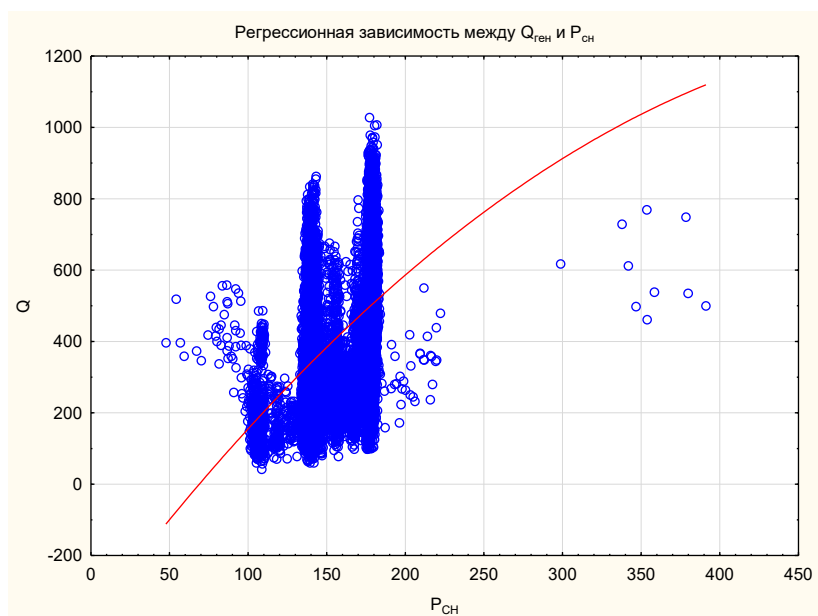


Рис. 5. Регрессионная зависимость между $Q_{ген}$ и $P_{сн}$

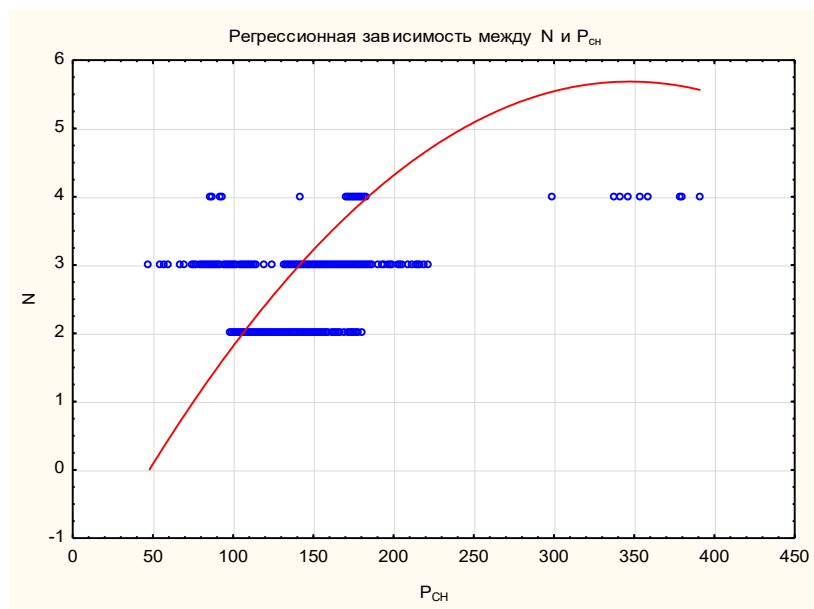


Рис. 6. Регрессионная зависимость между количеством блоков в работе и $P_{сн}$

4. Температура атмосферного воздуха. На рис. 7 изображена регрессионная зависимость между температурой атмосферного воздуха и $P_{сн}$. Существование данной зависимости вероятно, поскольку в отопительный период задействуется дополнительное оборудование (сетевые насосы), потребление которого может зависеть от объема отпускаемой тепловой энергии.

Регрессионная связь описывается следующим уравнением:

$$f = -0,000003x^2 + 0,13x - 12,53,$$

где f – температура наружного воздуха в регионе электростанции; x – расход электроэнергии на СН.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.04$; следовательно, потребление на СН не зависит от данного фактора.

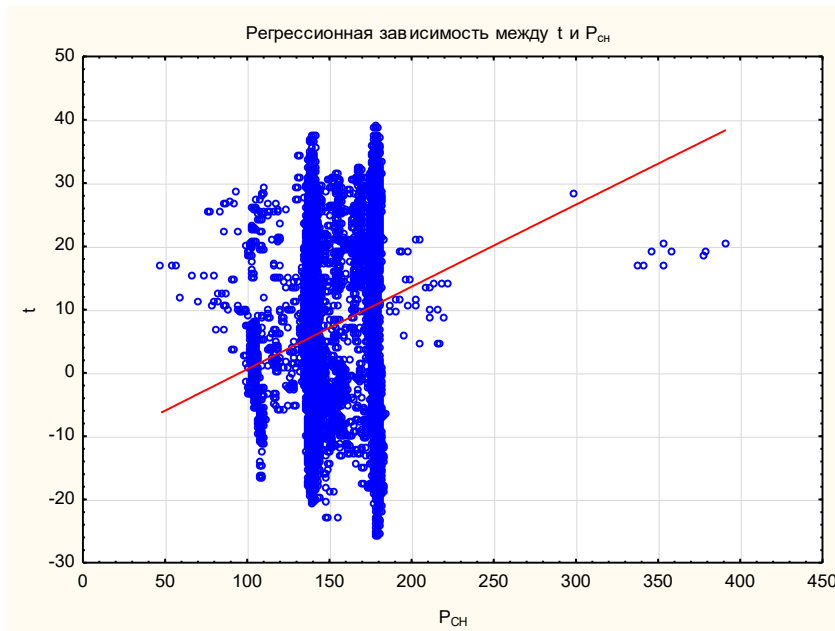


Рис. 7. Регрессионная зависимость между температурой наружного воздуха и $P_{сн}$

Таким образом, прослеживается сильная прямая корреляционная связь между потреблением электроэнергии на СН и выработкой активной мощности и средняя связь между потреблением на СН и выработкой реактивной мощности. Связь с температурой наружного воздуха отсутствует.

Выявленные факторы авторы планируют в дальнейшем использовать в качестве входных данных для построения прогноза потребления СН. В качестве математической модели прогноза планируется использовать нейронные сети.

Задача прогнозирования успешно решается ИНС благодаря их способности к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными. В этой задаче использование нейронных сетей дает существенные преимущества:

- ИНС позволяет моделировать нелинейные зависимости, что сложно и длительно в случае применения статистических методов;
- способность к обучению позволяет упростить подготовку к вычислениям, устраняя необходимость в ручном расчете весов или коэффициентов;
- возможно обеспечение более быстрой реакции на изменения входных данных, чем у статистических моделей;
- адаптация к изменяющимся условиям устраняет необходимость построения модели заново при изменении факторов, считавшихся постоянными, или при адаптации модели к другой станции.

Нейронные сети показали хорошие результаты в задачах прогнозирования СН ТЭЦ [11] и промышленных предприятий [10, 12].

Выводы

В результате анализа потребления электроэнергии на собственные нужды одной из российских АЭС определено, что существующий метод прогнозирования имеет недостаточную точность в переходные периоды при включении и отключении блоков. Изучено влияние различных факторов на потребление СН; установлено, что значимое влияние оказывают выработка активной мощности и количество блоков в работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доля атомной энергетики в общей генерации электроэнергии в РФ начнет расти после 2030 года – ТАСС [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/12751945> (дата обращения: 16.08.2022).
2. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» (с изменениями на 1 июня 2022 года).
3. Методические рекомендации по несению нагрузки АЭС для обеспечения наибольшей экономической эффективности при реализации товарной продукции МР – ОПП.91.00.01. 2017.
4. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Прогнозирование параметров промышленного электропотребления в условиях волатильности ценовых сигналов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2012. № 30. С. 116–123.
5. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation // PeerJ. Computer Science. 2021. Т. 7. С. 623.
6. Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
7. Козлов А.Н., Козлов В.А., Ротачева А.Г. Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Благовещенск: АмГУ, 2013. 315 с.
8. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур // Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2008. 78 с.
9. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: Учеб. 9-е изд., испр. М.: Изд. дом «Дело» РАНХиГС, 2021. 504 с.
10. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в электроэнергетических системах с использованием искусственных нейронных сетей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Алексеева И. Ю. 2014. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011144263/ (дата обращения: 24.11.2022).
11. Ведерников А.С., Ярыгина Е.А. Разработка методики краткосрочного прогнозирования электропотребления системы собственных нужд ТЭЦ // Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов XLI международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 15–17 октября 2019 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2020. С. 52–58.
12. Gofman A.V., Vedernikov A.S., Vedernikova E.S. Increasing the accuracy of the short-term and operational prediction of the load of a power system using an artificial neural network // Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 46. No 5. P. 410–415.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2023 г.

FACTORS AFFECTING THE PREDICTION OF AUXILIARY POWER CONSUMPTION OF THE NUCLEAR POWER PLANTS

A.S. Vedernikov, A.S. Shipilov, E.A. Yarygina¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: vedernikovas@rambler.ru, alss.p@mail.ru, balukova_e@mail.ru

Abstract. According to the rules of the Wholesale Electricity and Capacity Market, a power plant is both a producer of electricity and its consumer, is obliged to form a forecast of electricity consumption to form an energy balance, and is financially responsible for the deviation of actual consumption from that given in the forecast. The first part of the article analyzes the accuracy of the existing method for predicting the auxiliary power consumption of one of the operating nuclear power plants. The calculation of various estimates of the forecasting error has been performed and it is shown that the method used in certain time intervals has insufficient accuracy. The second part analyzes the factors that potentially affect the auxiliary power consumption, evaluates the quality of the regression relationship between these factors and power consumption, and concludes that they are significant for the development of a new forecasting technique.

Keywords: power plants, own needs, forecasting, power consumption

REFERENCES

1. The share of nuclear energy in the total electricity generation in the Russian Federation will begin to grow after 2030. <https://tass.ru/ekonomika/12751945> (accessed August 16, 2022).
2. Decree of the Government of the Russian Federation of December 27, 2010 N 1172 "On Approval of the Rules of the Wholesale Electricity and Capacity Market and on Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation on the Organization of the Functioning of the Wholesale Electricity and Capacity Market" (as amended as of June 1, 2022).
3. Methodological recommendations for bearing the load of nuclear power plants to ensure the highest economic efficiency in the sale of marketable products of MR (OPP.91.00.01), 2017.
4. Solovieva I.A., Dziuba A.P. Prognozirovanie parametrov promyshlennogo elektropotrebleniya v usloviyakh volatil'nosti cenovykh signalov [Forecasting the parameters of industrial power consumption in the conditions of volatility of price signals] // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Jekonomika i menedzhment. Chelyabinsk, 2012. No. 30. Pp. 116–123. (In Russian)
5. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation // PeerJ. Computer Science, 2021. Vol. 7. Pp. 623.
6. Bunn D.W., Farmer E.D. Comparative Models for Electrical Load Forecasting. Chichester, 1985.
7. Kozlov A.N., Kozlov V.A., Rotacheva A.G. Sobstvennye nuzhdy teplovykh, atomnykh i gidravlicheskh stanciy i podstanciy [Own needs of thermal, nuclear and hydraulic stations and substations]. Blagoveshchensk, Publishing House of the AmGU, 2013. 315 p. (In Russian)
8. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. Prognozirovanie jelektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii jelektroenergeticheskimi sistemami na osnove nejrosetevykh struktur [Prediction of electrical loads in the operational management of electric power systems based on neural network structures] // Syktyvkar, KNTs UrO RAN, 2008. 78 p. (In Russian)
9. Magnus Ya.R., Katyshev P.K., Peresetsky A.A. Jekonometrika. Nachal'nyj kurs [Econometrics. Initial course]. M.: Publishing house "Delo" RANEPa, 2021. 504 p. (In Russian)
10. Alekseeva I.Yu. Kratkosrochnoe prognozirovanie jelektropotrebleniya v jelektroenergeticheskikh sistemah s ispol'zovaniem iskusstvennykh nejronnykh setej. Diss. ... kand. tehn. nauk.

¹  © The Author(s), 2023

2014. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011144263/ (accessed November 11, 2022). (In Russian)
11. *Vedernikov A.S., Yarygina E.A.* Development of a methodology for short-term forecasting of the power consumption of the CHP auxiliary system // *Kibernetika jenergeticheskikh sistem* [Cybernetics of energy systems]. Novocherkassk, South-Russian State Polytechnic University, 2020. Pp. 52–58. (In Russian)
 12. *Gofman A.V., Vedernikov A.S., Vedernikova E.S.* Increasing the accuracy of the short-term and operational prediction of the load of a power system using an artificial neural network // *Power Technology and Engineering*. 2013. Vol. 46, no 5. Pp. 410–415.

Original article submitted 23.04.2023